

2 Revisão Bibliográfica

O presente capítulo apresenta os processos envolvidos na geração do cascalho de perfuração, objeto deste trabalho. Aqui são apresentadas todas as variantes envolvidas na produção deste complexo resíduo da indústria de petróleo. Faz-se uma abordagem da fase de perfuração do poço, dos fluidos de perfuração utilizados até a geração dos grandes volumes de cascalho de perfuração. É apresentado o estado da arte com respeito às técnicas utilizadas para tratamento e destinação final deste resíduo. Em particular, é feita uma abordagem sobre a utilização de resíduos industriais na produção de cerâmica vermelha bem como a utilização de resíduo incorporado a massa de solo para construção de bases de pavimentos de rodagem.

2.1. A perfuração de poços de petróleo

Em linhas gerais, a perfuração de um poço de petróleo ocorre em duas fases: a de exploração e a de desenvolvimento. As atividades de exploração são as que envolvem a perfuração de um poço para localizar reservas de hidrocarbonetos, bem como suas dimensões e potencial produtivo. A fase de desenvolvimento ocorre uma vez que as reservas de hidrocarbonetos já foram descobertas, delineadas e confirmada a sua viabilidade comercial. Entretanto, independente da natureza do poço, ambas geram resíduo de perfuração.

O método de perfuração rotativa é o mais empregado pela indústria do petróleo, embora atualmente exista a combinação do rotativo e percussão. Nele uma torre de perfuração fica apoiada sobre uma superestrutura, onde localiza-se a chamada mesa rotativa. Esta mesa sustenta e comunica um torque à coluna de perfuração, formada por diversos tubos conectados entre si com uma broca cortante em sua extremidade, o avanço da broca perfura as formações geológicas subjacentes em direção aos potenciais reservatórios. Ao avanço da perfuração, a coluna de perfuração é aumentada a partir da superfície. Durante a perfuração a

broca lança um fluido que circula pelo poço, chamado de fluido de perfuração, este retorna à superfície através do espaço anular entre a coluna de perfuração e a parede do poço, carreando a rocha triturada que é denominada cascalho de perfuração.

A Figura 2-1 apresenta uma sonda de perfuração de poços de petróleo atualmente empregada pelo Petrobras no Recôncavo Baiano.



Figura 2-1 – Sonda 108 da Petrobras em operação no Recôncavo Baiano.

De acordo com Thomas (2001), o mecanismo de perfuração de um poço de petróleo é composto de quatro sistemas principais que serão descritos a seguir.

2.1.1. Um sistema de força

Este sistema é primordial para os demais sistemas a seguir. Por esse sistema as sondas de perfuração podem transmitir energia para seus equipamentos, por via mecânica ou diesel-elétrica. Os equipamentos de sondagem *onshore* são

geralmente movidos a motores diesel. As sondas marítimas costumam se aproveitar da geração de gás para acionar turbinas e gerar energia para a plataforma.

2.1.2. Sistema de suspensão

O sistema de suspensão tem a função de sustentar e manobrar cargas (como a coluna de perfuração, revestimentos ou quaisquer outros equipamentos) para dentro ou fora do poço. Os componentes principais deste sistema são a torre ou mastro, o guincho, o bloco de coroamento e a catarina. A torre é uma estrutura que provê altura vertical necessária para elevar ou abaixar a coluna de perfuração, além de sustentar polias e cabos. A coluna de perfuração é formada por seções de tubos rígidos, que necessitam de espaço vertical livre para ocupar ao serem içados do poço. A Figura 2-2 apresenta um diagrama esquemático de uma sonda rotativa, dando destaque aos componentes do sistema de suspensão.

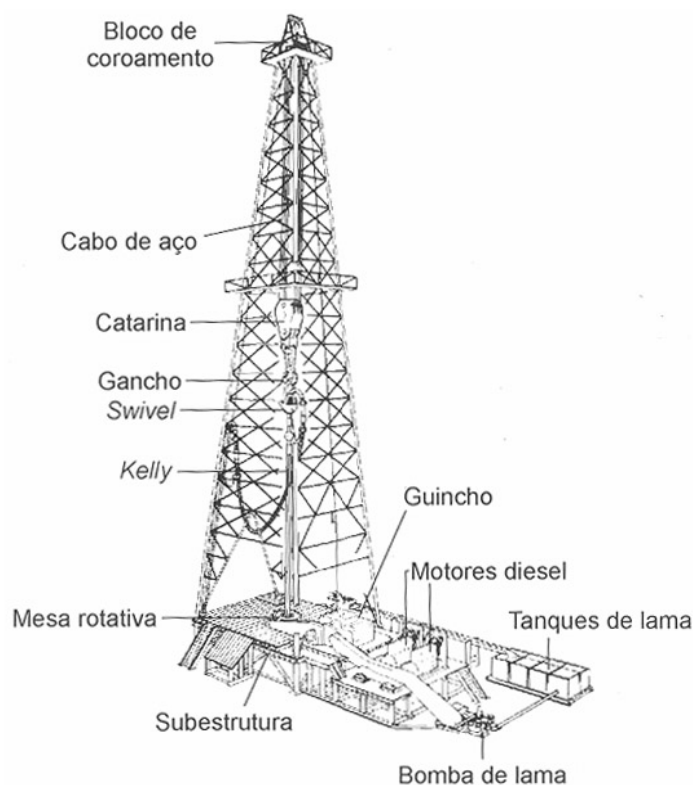


Figura 2-2 – Desenho esquemático de uma sonda rotativa, (Thomas, 2001).

A movimentação pelo poço da coluna de perfuração e demais equipamentos é realizada com o auxílio de um guincho, que compreende basicamente o bloco de coroamento (polias fixas) e a catarina (polias móveis), com a função de içar e deslocar cargas pesadas.

2.1.3. Sistema rotativo

O sistema rotativo é o responsável pela rotação da coluna de perfuração, compreendendo todos os equipamentos utilizados para girar a coluna de perfuração.

Na sonda convencional os principais componentes deste sistema são a mesa rotativa, a haste quadrada (*kelly*) e a cabeça de injeção (*swivel*). A mesa rotativa é o equipamento que transmite o movimento de rotação à coluna de perfuração. A haste quadrada é a parte da coluna de perfuração localizada na superfície que transmite o torque da mesa rotativa ao resto da coluna. A cabeça de injeção é o equipamento que sustenta o peso da coluna de perfuração e permite seu giro, constituindo elemento de ligação entre a parte rotativa abaixo da haste quadrada e a fixa.

2.1.4. Sistema de circulação

O sistema de circulação é responsável pela circulação e tratamento do fluido de perfuração na sonda. Sua função principal é remover do interior do poço o cascalho de perfuração triturados pela broca, transportando-o para a superfície junto com a lama de perfuração, desobstruindo a passagem da broca. O cascalho que chega à superfície traz informações importantes sobre as formações perfuradas, sendo objeto de análise de geólogos que acompanham o processo de perfuração em tempo real.

Os principais componentes deste sistema são as bombas de lama, tanques de fluido e os diversos equipamentos de controle de sólidos. Estes se destinam à reciclagem do fluido de perfuração.

As bombas de lama bombeiam o fluido de perfuração para dentro do poço. Descendo pela coluna de perfuração, o fluido é expelido pela broca e retorna pelo

espaço anular. O sistema é fechado, quando o fluido chega à superfície é acondicionado e tratado nos tanques de fluido. Os equipamentos de controle de sólidos são peneiras, decantadores, desareiaadores, dessiltadores, desgaseificadores e centrífugas. Podem existir variações no sistema de controle de sólidos de acordo com as exigências de cada legislação ambiental ou o rigor de cada operador, como quantidade de peneiras ou eficiência de cada equipamento.

2.2. Fluido de perfuração

O fluido de perfuração, a depender de sua natureza, é o agente que confere toda possível contaminação a cascalho de perfuração. Para compreender melhor a complexidade do cascalho de perfuração é fundamental que se entenda a influência do fluido utilizado na perfuração de um poço.

Os fluidos de perfuração são misturas de sólidos, líquidos, aditivos químicos e/ou gases. Eles podem assumir o aspecto de suspensões, emulsões ou dispersões coloidais, dependendo do estado físico de seus componentes. Na perfuração dos primeiros poços de petróleo se utilizava a própria argila da formação misturada à água formando uma espécie de lama, motivo do fluido também ser denominado lama de perfuração como descreve Veiga (1998).

Segundo van Dyke (2000), as principais funções dos fluidos de perfuração são:

- Lubrificar e resfriar a broca - o peso e a rotação sobre a broca são muito elevados gerando atrito e, conseqüentemente, calor necessitando de resfriamento oferecido pelo fluido de perfuração. A fricção entre a broca e as paredes do poço também é muito elevada, exigindo lubrificação também proporcionada pelo fluido;
- Limpar o poço e transportar o cascalho à superfície - o fluido de perfuração tem a função de “limpar” o poço, ou seja, abrir passagem para a broca retirando os pedaços de rocha já triturados;
- Proteger e suportar as paredes do poço - o fluido de perfuração fornece a pressão hidrostática necessária para evitar o colapso das paredes do poço. O controle das pressões no interior do poço é feito pelo fluido através da geração de uma pressão hidrostática. Uma parcela penetra nos poros da

formação que grudam nas paredes do poço formando uma fina camada impermeável que estabiliza as formações. Esta camada além de estabilizar as paredes do poço reduz a absorção de fluido de perfuração pelas formações;

- Trazer à superfície informações a respeito das formações perfuradas - o cascalho e o fluido de perfuração que chegam à superfície constituem fontes de informações sobre as formações que estão sendo perfuradas.

É um desafio para a indústria do petróleo a busca por um ponto ideal, entre custo e desempenho do fluido de perfuração. A partir da década de 80 o atendimento as exigências ambientais passou também a influenciar na escolha do fluido de perfuração que é utilizado no processo de perfuração.

Os fluidos de perfuração se diferenciam quanto à sua base, que pode ser à base de água, óleo e ainda os chamados fluidos sintéticos. Podem ser utilizados fluidos de perfuração de diferentes bases para cada fase de perfuração de um mesmo poço.

2.2.1. Os fluidos de perfuração à base de água

A grande maioria dos fluidos de perfuração utilizados no mundo são formados por líquidos à base de água. O fluido à base de água consiste numa mistura de sólidos, líquidos e aditivos químicos tendo a água como a fase contínua. À base pode ser de água salgada, água doce ou água salgada saturada conforme mencionam Economides *et al.* (1998).

De acordo com Veiga (1998), os principais tipos de fluidos à base de água são os fluidos convencionais, os fluidos naturais, os fluidos dispersos tratados com lignosulfonados, os fluidos tratados com cal, os fluidos tratados com gesso, os fluidos não dispersos tratados com cal e polímeros, os fluidos salgados tratados com polímeros, os fluidos à base de KCl, os fluidos isentos de sólidos e os fluidos biopoliméricos.

Os fluidos de perfuração à base de água possuem um baixo custo comparado aos demais, são biodegradáveis e se dispersam facilmente na coluna d'água como menciona Durrieu *et al* (2000). Infelizmente, os fluidos de perfuração à base de

água possuem algumas desvantagens. Algumas formações possuem argilominerais que reagem quimicamente com a água do fluido de perfuração, e provocando expansão da argila e dispersando partículas pelo fluido e por todo o poço. Este é um grave problema causado pela utilização de lamas à base de água, provocando também instabilidade ao poço e perda de fluido para as formações. Isto também provoca uma geração de volume extra de cascalho de perfuração.

A solução para os problemas apontados anteriormente é “inibir” o fluido através da adição de substâncias químicas que impeçam ou diminuam sua reação com a água, são os denominados “inibidores” como o sódio, potássio e íons de cálcio, que reduzem a atividade dos sólidos ativos minimizando a hidratação da argila e dos folhelhos.

2.2.2. Os fluidos de perfuração à base de óleo

Os fluidos de perfuração à base de óleo foram desenvolvidos para situações em que os à base de água apresentavam limitações técnicas e operacionais. As lamas à base de óleo são similares em composição à base de água, exceto pela fase contínua que passa a ser o óleo. A água está presente na lama à base de óleo sob a forma de uma emulsão, onde as gotas de água ficam suspensas no óleo caracterizando uma emulsão de água em óleo, o que torna necessário adicionar um emulsionante químico para impedir que as gotas d’água coalesçam.

Os fluidos à base de óleo são muito utilizados, apesar de custarem de 2 a 4 vezes mais do que os de base aquosa. Friedheim e Shinnie (1991) justificam que o seu uso está relacionado a um desempenho superior para determinadas e freqüentes situações, como na perfuração de formações com folhelhos altamente reativos com lamas à base de água, na perfuração de poços sujeitos a altas pressões e temperaturas, em poços direcionais, de poços que requisitassem uma maior lubrificação entre a coluna e as formações ou quando as condições geológicas requisitassem uma maior estabilização do furo do poço.

Vários autores, entre eles Hall (2001), Veiga (1998); Bleier *et al.* (1992), relacionaram uma série de vantagens da perfuração com lamas à base de óleo em comparação com as de base aquosa, incluindo:

- Compatibilidade com as formações sensíveis à água;

- Minimização da corrosão e desgaste de equipamentos de perfuração;
- Maior estabilidade térmica e estrutural na perfuração de poços profundos e com altas temperaturas;
- Melhor lubrificação, facilitando a perfuração de poços direcionais;
- O fluido à base de óleo pode ser reaproveitado após tratamento adequado;
- A perfuração é feita mais rapidamente, proporcionando um aumento das taxas de avanço.

Infelizmente, ao mesmo tempo em que ganham em desempenho, as lamas à base de óleo são mais prejudiciais ao meio ambiente. Durrieu *et al.* (2000) assinalam que a toxicidade é uma desvantagem insuperável das lamas a base de óleo, posto que elas são altamente tóxicas e se biodegradam lentamente.

2.2.3. Os fluidos de perfuração sintéticos

Os fluidos de perfuração sintéticos foram desenvolvidos como uma alternativa às limitações de desempenho dos à base de água em resposta às restrições ambientais impostas aos fluidos à base de óleo. Utilizando como fluido à base de substâncias químicas sintéticas, os fluidos sintéticos são também chamados “pseudo-lamas à base de óleo”, pois na prática as substituem, oferecendo menor toxicidade e produção de volume, de resíduos e de perfuração.

De acordo com Schaffel (2002), os fluidos sintéticos são muito utilizados em áreas marítimas onde é proibido o descarte de cascalho quando se perfura com lamas à base de óleo. Os fluidos sintéticos são mais caros do que os oleosos, não deixando de serem economicamente compensadores, pois o descarte marítimo dos fluidos de perfuração à base de óleo está proibido em diversas partes do mundo, implicando em custos e riscos extras a serem assumidos com o transporte dos resíduos para descarte em terra.

2.3. Cascalho de perfuração

Al-Tabbaa (2006) sugere que o cascalho de perfuração possa ser classificado como um material heterogêneo, perigoso, com concentrações significantes de hidrocarbonetos, metais pesados e sais solúveis em água. No

entanto, há que se ressaltar que as características físicas e químicas do cascalho são muito variáveis, uma vez que são dependentes da geologia local, do fluido de perfuração utilizado, da técnica de escavação e do tipo de broca utilizado na perfuração.

O volume de cascalho de perfuração produzido durante uma escavação de um poço de petróleo é variável posto que a quantidade produzida é proporcional a profundidade do poço perfurado, diâmetro do poço e das características geológicas das formações perfuradas. Teoricamente o volume de cascalho gerado durante a perfuração de um poço é o volume geométrico do cilindro perfurado, ou também chamado volume nominal do poço. Contudo neste processo é adicionado o fluido de perfuração, o que faz aumentar o volume de resíduo produzido.

A estimativa média de produção de cascalho de perfuração em poços perfurados em terra no Brasil, *on-shore*, é de 13 m³ a cada 100 metros de avanço da perfuração (MI Swaco, 2009). No Recôncavo Baiano são produzidos em média de 200 a 250 m³ por poço (Petrobras, 2009).

Mundialmente a quantidade de cascalho produzido é cada vez maior, haja vista a constante perfuração de novos poços a fim de suprir a necessidade mundial por derivados do petróleo. Page *et al.* (2003) mencionam que somente no Reino Unido seja produzida cerca de 80 mil toneladas anualmente.

2.3.1. Propriedades físicas e mineralógicas

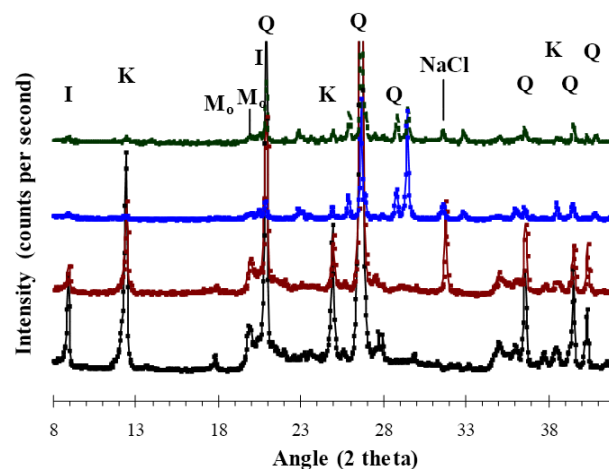
As propriedades físicas do cascalho são muito variáveis uma vez que são dependentes da geologia do local no qual se faz a perfuração. Observa-se ainda que para um mesmo poço de petróleo perfurado, dada as grandes profundidades que se atinge o poço, o cascalho produzido pode apresentar diferentes características a depender do extrato perfurado. Destaca-se que em uma mesma perfuração de um poço são utilizados diferentes tipos de fluido, o que confere ao cascalho de perfuração produzido uma maior heterogeneidade. Para o cascalho de perfuração produzido não há nenhuma segregação para separar o cascalho com diferentes graus de contaminação e para as diferentes composições mineralógicas. No Recôncavo Baiano, o cascalho é muitas vezes estocados em um mesmo local à medida que se avança o processo de perfuração, conforme mostra a Figura 2-3.



Figura 2-3 – Cascalho de perfuração estocado após processo de perfuração do poço MG-112, Campo de Miranga, Pojuca-Ba.

Tendo em vista as variáveis envolvidas no processo de perfuração a distribuição granulométrica do cascalho bem como a sua composição mineralogia é muito variável.

No Mar Vermelho, como descreve Al-Ansary e Al-Tabbaa (2007), o cascalho tinha a sua composição granulométrica distribuída entre 50% de silte, 40% de argila e 10% de areia fina, apresentando limite de liquidez de 51% e índice de plasticidade de 26%. A sua composição mineralógica, determinada através da análise de difração de raios X, vista na Figura 2-4, consistia de caulinita, motmorilonita, ilita, quartzo e cloreto de sódio.



I = ilita; K = Caulinita; M_o = Motmorilonita; Q = Quartzo; NaCL = Cloreto de Sódio

Figura 2-4 – Composição mineralógica do Cascalho do Mar Vermelho (Al-Ansary *et al.* 2007).

Já no Recôncavo Baiano, Vaqueiro *et al.* (2006) descrevem um cascalho composto granulometricamente por 45% de silte, 25% de argila, 20% de areia fina e 10% de areia média. De acordo com os autores, este material possui 39% de limite de liquidez e 12% de índice de plasticidade e a composição mineralógica de suas partículas é constituída basicamente de caulinita, illita, quartzo e barita.

Page *et al.* (2003) mencionam que o peso específico normalmente considerado pela indústria de petróleo para o cascalho de perfuração é de 21kN/m^3 . Porém pode-se encontrar cascalho de perfuração com peso específico variando entre 13KN/m^3 e 27 kN/m^3 . Os mesmos autores citam que a resistência ao cisalhamento de pilhas de cascalho de perfuração podem variar entre 10kPa e 40kPa, para os materiais avaliados no seu trabalho. No entanto, há de admitir que esses valores são influenciados pelo teor de umidade e de fluido presente no cascalho de perfuração.

Chen *et al.* (2007) avaliaram técnicas de tratamento de cascalho de perfuração produzido pela companhia chinesa de petróleo em campos de produção de petróleo em Taiwan. Em seus experimentos, Chen determinou a composição mineralógica dos cascalhos de perfuração através da técnica da difração de Raios X e verificaram que a maioria dos minerais presentes nesses materiais eram barita e quartzo, seguidos de muscovita, calcita, caulinita e cloretos. Segundo os autores, a presença de barita e cloretos é decorrência do fluido de perfuração.

2.3.2. Propriedades químicas

O cascalho de perfuração possui elevadas concentrações de óleo, sais solúveis em água e metais pesados.

Os sais inorgânicos são adicionados em elevadas concentrações a lama de perfuração para impedir a migração do sal da formação rochosa para o poço, minimizando o colapso hidráulico das paredes do poço. No processo, a salmoura é emulsificada na fase óleo do fluido e impede a reação do fluido de perfuração com a argila da formação rochosa.

A lama de perfuração a base óleo possui geralmente em sua composição de 10% a 50% de sais inorgânicos. Os sais normalmente adicionados as lamas de perfuração são cloreto de cálcio, cloreto de magnésio, cloreto de potássio e cloreto

de sódio. Segundo Page *et al.* (2003), o cloreto de cálcio é o sal mais utilizado pela indústria de perfuração de poços de petróleo e chega a representar 30% do fluido de perfuração à base óleo. Os mesmos autores mencionam que em fluidos de perfuração a base água usa-se a água do mar.

A presença de vários tipos e concentrações elevadas de metais pesados no cascalho de perfuração é devido às impurezas no sulfato de bário (Barita). A barita tem a finalidade de aumentar a densidade da lama de perfuração para manter a pressão hidrostática do poço evitando o colapso da parede do poço. Page *et al.* (*op. cit.*) menciona que entre as impurezas mais encontradas na Barita incluem-se: arsênio, bário, cádmio, cromo, ferro, cobre, manganês, mercúrio, níquel, selênio, vanádio e zinco. No entanto, há que se ressaltar que esses metais podem estar naturalmente presentes na formação geológica.

A Barita é bastante empregada por ser muito estável, não estando livre para reagir ou lixiviar o cascalho de perfuração de seus constituintes, sendo possível através de técnicas de reaproveitamento do fluido de perfuração separá-la do cascalho de perfuração e poder reutilizá-la novamente no processo de perfuração. As técnicas de reuso do fluido de perfuração favorecem a redução da contaminação do cascalho de perfuração favorecendo o tratamento do resíduo em questão.

A Tabela 2-1 exemplifica a composição química de três cascalhos de perfuração do Mar do Norte (Page *et al.*, 2003).

Tabela 2-1 – Composição Química do Cascalho de Perfuração produzido no Mar do Norte (Page *et al.*, 2003).

Composto		Mar do Norte		
		Central	Campo de Beryl	Campo de Ekofisk
SiO ₂	%	44.43	35.34	54.98
Al ₂ O ₃	%	12.54	3.79	6.95
BaO	%	6.49	20.96	
Fe ₂ O ₃	%	6.53	4.38	4.02
CaO	%	2.53	6.98	4.33
K ₂ O	%	2.01	0.89	1.38
MgO	%	1.59	1.16	2.15
Na ₂ O	%	1.12	0.80	1.07
TiO ₂	%	0.61	0.16	0.34
MnO	%	0.22	0.11	0.15
P ₂ O ₅	%	0.16	0.10	0.07
Cl	%	0.67	0.88	0.92
BaSO ₄	%			9.59

SrO	%	0.14		
-----	---	------	--	--

A presença de óleo no fluido de perfuração é de até 40% do peso total do fluido. Na utilização de fluido a base óleo em processos de perfuração haverá a presença de compostos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's) no cascalho de perfuração.

Al-Ansary (2007), ao realizar um comparativo da concentração de cascalhos de perfuração do Mar do Norte e do Mar Vermelho, constatou uma similaridade entre suas composições. A exceção da concentração de hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH), as demais características descritas na Tabela 2-2 apresentam valores semelhantes.

Tabela 2-2 – Comparação entre o cascalho produzido no Mar do norte e no Mar Vermelho Al-Ansary *et al.* (2007).

Composto		Mar Vermelho	Mar do Norte
Hidróxido de Sódio	mg/kg	500	500
TPH	mg/kg	42.000	109.500
Cloretos de sódio	mg/kg	33.200	34.816
pH		9,0	9,0

Embora a contaminação do cascalho de perfuração por hidrocarbonetos possa ocorrer pelo reservatório perfurado, à maior contribuição para a contaminação é dada pelo fluido de perfuração conforme sugere Chaineau *et al.* (2003).

Chaineau *et al.* (2003) descreve um cascalho de perfuração produzido na Indonésia, no qual foi utilizado fluido de perfuração a base óleo que era composto de 65% de óleo desaromatizado, 25% de água, 1,5% de emulsificante, 5% de cloreto de cálcio e 5% de cal hidratada. Segundo os autores, o resultado foi um cascalho de perfuração de textura arenosa, e alcalina com pH da ordem de 11,1, contendo 14% de hidrocarbonetos e elevadas concentração de Cálcio. O óleo desaromatizado possuía 10% de parafina e 90% de hidrocarbonetos de cadeia nC10-nC23. Por cromatografia gasosa foi determinado que os hidrocarbonetos presentes no cascalho de perfuração pertenciam aos hidrocarbonetos de cadeia nC10-nC23, os mesmos presentes no fluido de perfuração.

2.3.3. Técnicas utilizadas na disposição e tratamento do cascalho de perfuração

Veil (2002) menciona que as técnicas mais utilizadas para destinação final do cascalho de perfuração usada pela indústria de petróleo são:

- Aterros controlados;
- Pavimentação de rodovias;
- Diques enterrados próximos a poços perfurados;
- Re-injeção em poços de petróleo inativos;
- Armazenamentos em cavernas de sal;
- Tratamento Térmico;
- Re-uso após tratamento prévio;
- Métodos de Inertização.

Em concordância com Veil *et al.* (*op. cit.*), Chen *et al.* (2007) menciona que a prática de tratamento mais utilizada para cascalhos produzidos *on-shore* em quase todos os países produtores de petróleo, é a sua disposição em diques ou em aterros para resíduos sólidos perigosos.

No Brasil, por muito tempo era comum a adoção de diques enterrados para destinação final do cascalho na proximidade do poço perfurado. O cascalho não recebia nenhum tratamento prévio para reduzir seu grau de contaminação. Esses diques enterrados podem hoje serem considerados com um passivo da indústria de petróleo nacional, sendo que não há registro exato sobre a localização nem a quantidade existente destes materiais enterrados.

Para o cascalho produzido *off-shore* ainda é largamente utilizado o descarte do cascalho produzido diretamente no mar. No Brasil, conforme menciona Schaffel (2002), a Petrobras considera como “boa prática” em águas brasileiras o descarte de cascalho com até 10% de fluido aderido. Isto se dá por não haver no Brasil uma regulamentação que limite o uso de fluidos de perfuração em perfuração *off-shore*, embora se tenha um grupo de trabalho formado por profissionais do IBP (Instituto Brasileiro de Petróleo) e da Coordenação Geral de Petróleo e Gás do IBAMA (CGOEG/IBAMA) que esteja tratando da sua criação. Esta será a primeira norma legal no país sobre o assunto. Segundo a revista TN

Petróleo (2009), a minuta desenvolvida pelo Instituto, foi apresentada ao IBAMA em dezembro de 2008.

Atualmente em atividades de perfuração *on-shore* no Brasil, adota-se como solução principal a destinação do resíduo de perfuração para aterro de resíduos perigosos. A Figura 2-5 apresenta a central de resíduos de Alto Jericó, onde são lançados resíduos oriundos de poços escavados pela Petrobrás no Campo de Carmópolis - SE.



Figura 2-5 – Central de Resíduos do Alto Jericó - Sergipe.

Algumas sondas de perfuração de poços de petróleo utilizam um sistema de controle de sólidos, que têm a finalidade principal de reduzir o custo da perfuração pelo reaproveitamento do fluido de perfuração.

Conforme descreve Schaffel (2002), um sistema típico de controle de sólidos é composto inicialmente de uma peneira vibratória onde são separados do fluido os sólidos mais grosseiros. Em seguida o fluido passa por um conjunto de dois a quatro hidrociclones de cerca de 20 a 50 cm de diâmetro. A função de um hidrociclone, também chamado de desareiator, é acelerar o processo natural de decantação de partículas de um fluido, nesse caso, basicamente a areia. Em seguida a lama de perfuração passa por outro hidrociclone onde ocorre separação de partículas da faixa silte do fluido. Segundo o autor, a depender do poço podem haver de oito a doze hidrociclones que separam partículas da faixa granulométrica silte.

A Figura 2-6 apresenta um sistema de controle de sólidos usado pela empresa MI-Swaco, uma das maiores empresas do Setor.

O fluido, ao sair dos hidrociclones, ainda pode ser direcionado a um *mud cleaner*, que se trata de um hidrociclone com uma peneira para recuperar partículas que retornarão ao fluido dispensando o acréscimo de mais aditivos ao fluido. Dependendo do caso, pode haver também uma centrífuga para retirar as partículas menores que ainda não tenham sido descartadas pelos hidrociclones. Depois deste processo, o fluido volta a ser bombeado para o poço e o cascalho de perfuração é depositado em caçambas para posterior transporte. A Figura 2-7 apresenta o cascalho de perfuração produzido após o processo de recuperação do fluido de perfuração.

Para esse cascalho, a MI-Swaco faz um controle onde se almeja um limite máximo de hidrocarboneto de 10%. O controle é realizado por um método expedito de campo onde é realizada uma destilação onde 50g de cascalho é inserido em uma mufla que realiza a separação da fase líquida da fase sólida. No fim da separação mede-se o volume de óleo e calcula-se o percentual de hidrocarbonetos no cascalho de perfuração. A Figura 2-8 apresenta o tubo de ensaio com água e óleo após processo de separação das fases sólida e líquida.



Figura 2-6 – Sistema de controle de sólidos da MI-Swaco.



Figura 2-7 - Cascalho de perfuração produzido após o processo de recuperação do fluido de perfuração.

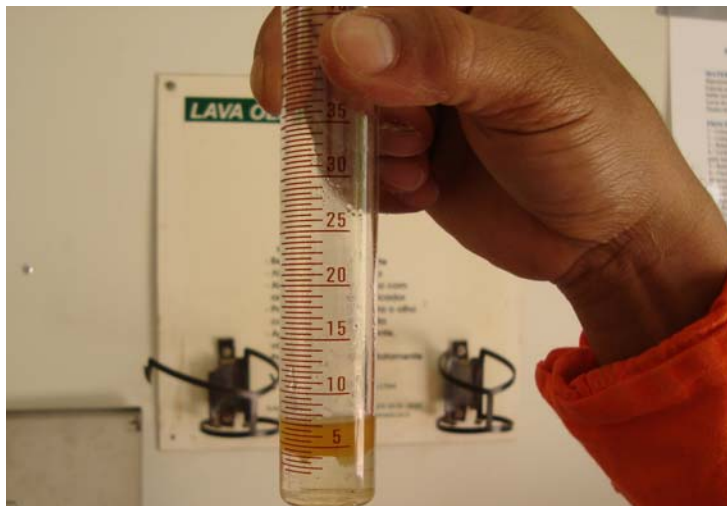


Figura 2-8 – Fase líquida destilada do cascalho de perfuração.

A Petrobras adota também como alternativa para tratamento do cascalho de perfuração a queima em fornos de *clinker* de cimenteiras, a um custo de R\$ 350,00 por tonelada de cascalho de perfuração (Petrobras, 2009). Neste processo os resíduos industriais alimentam, junto com o combustível, o maçarico do forno, que opera a 2000°C, temperatura que destrói o resíduo de forma integral. A fração mineral do resíduo vira matéria-prima, sem gerar novos resíduos ou alterar a qualidade do produto final.

De acordo com Chen (2007), o custo para tratamento do cascalho em Taiwan é da ordem de \$ 300.000 por poço perfurado. O autor menciona, que a

quantidade média de resíduo produzido por poço é cerca de 4.500 toneladas, o que resulta em quase US\$ 67,00 por tonelada de cascalho gerada.

Morillon (2002) apresenta a experiência de destinação de cascalho de perfuração em aterros controlados no Campo de Mabruk, Líbia. Em geral esse resíduo sofre um pré-tratamento físico ou térmico. No campo de Mabruk o aterro controlado, visto na Figura 2-9, foi projetado com uma impermeabilização de fundo para evitar a contaminação do solo e da água subterrânea. O topo do aterro controlado também era impermeabilizado mesmo durante a sua fase de operação, recebendo uma cobertura final ao término de sua capacidade. Este aterro ainda era dotado de um sistema de drenagem superficial para minimizar a contaminação do meio físico.

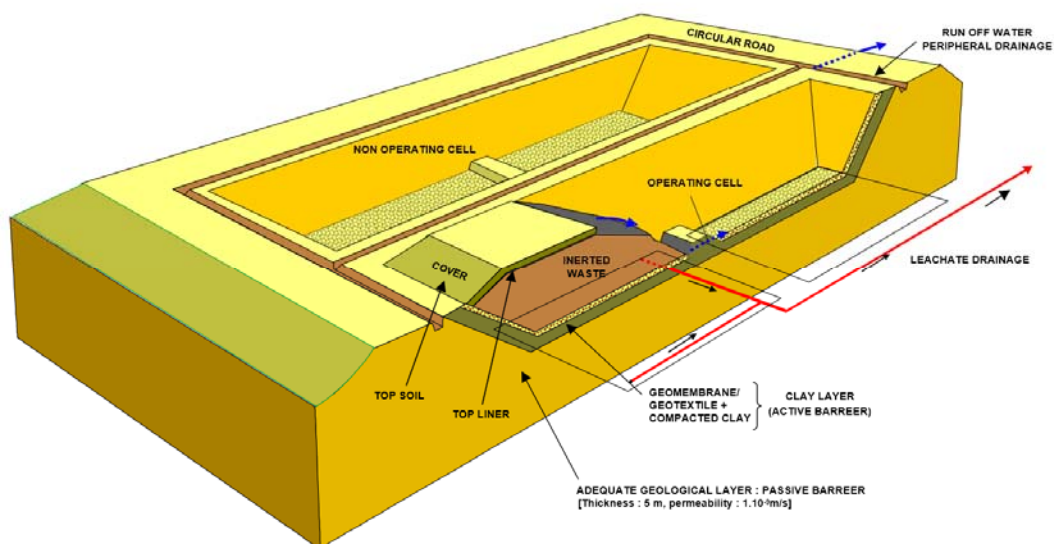


Figura 2-9 – Aterro controlado de Mabruk, Líbia (Morillon, 2002).

Em relação ao tema deste trabalho, Page *et al.* (2004) sugere que 30% dos programas de remediação da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos envolvem técnicas de solidificação e estabilização. Essa técnica, denominada no Brasil de encapsulamento, consiste em produzir uma estrutura sólida monolítica inerte e dessa forma prover a imobilização de compostos perigosos ou reduzir o potencial de lixiviação desses compostos. O processo de encapsulamento é a combinação de dois processos. A solidificação a qual produz uma estrutura sólida a partir do resíduo incorporado a uma massa cimentante e a estabilização que consiste em uma reação química a qual torna os componentes perigosos menos

susceptível ao processo de lixiviação e solubilização. Segundo o autor, o uso dessa técnica no tratamento de cascalho de perfuração é ainda muito limitado.

Pires (2004) avaliou como técnica de encapsulamento de cascalho de perfuração fazendo a substituição de parte do agregado miúdo por cascalho de perfuração na produção de corpos de prova de concreto, nos teores de 10%, 20% e 30% do total de areia utilizado em um traço de concreto para 15MPa. Os corpos de prova foram ensaiados a compressão uniaxial simples e tiveram perda de resistência acentuada com o aumento do teor de cascalho de perfuração. A Figura 2-10 apresenta o gráfico de percentagem de substituição da areia por cascalho de perfuração versus resistência a compressão e perda de resistência.

Na mesma linha, Chen (2007) fez uma substituição de 10% a 25% da massa argilosa por cascalho de perfuração pré-tratado para a produção de blocos cerâmicos para construção. Esse material foi seco ao ar e em seguida em estufa a 105°C por 24 horas. O material modelado foi queimado a uma temperatura variando entre 850°C e 1000°C. Com esse material foi produzido peças cerâmicas com resistência média de 10MPa. A Figura 2-11 apresenta as peças cerâmicas produzidas por Chen (2007).

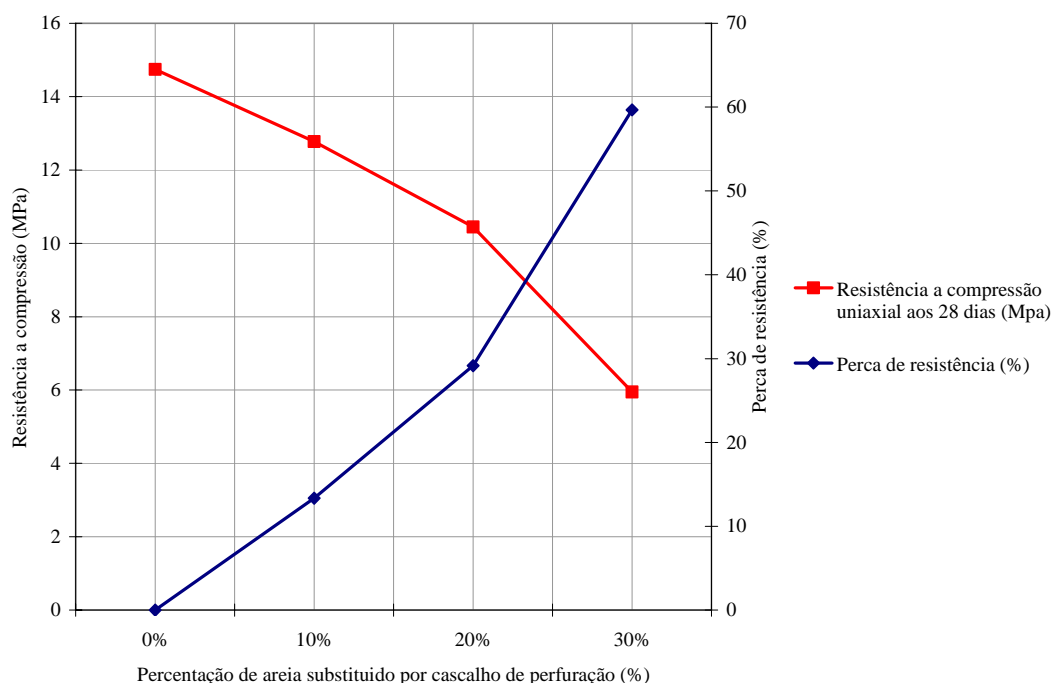


Figura 2-10 – Gráfico de percentagem de substituição da areia por cascalho de perfuração versus resistência a compressão uniaxial simples e perca de resistência de peças cerâmicas. Chen (2007).



Figura 2-11 - Peças cerâmicas produzidas por Chen (2007).

Depois da disposição em aterros, as técnicas de tratamento térmico são as mais utilizadas para tratamento do cascalho de perfuração, conforme atesta Morilon (2002). No campo de Canadon na Argentina o cascalho de perfuração é tratado por meio do processo de incineração. Esse processo consiste em eliminar compostos orgânicos adsorvidos a fase sólida. Um incinerador rotativo que opera numa temperatura entre 1200°C a 1500°C tem a capacidade de tratar várias toneladas de cascalho por dia produzindo apenas cinzas, tratando ainda as emissões produzidas durante o processo de oxidação.

A dessorção térmica também é muito utilizada para remediação de cascalho de perfuração. Essa técnica é menos destrutiva que a incineração uma vez que tem uma temperatura de operação em torno de 400°C. Na dessorção térmica o aquecimento do resíduo promove a sua descontaminação como também pode favorecer a recuperação do óleo adsorvido ao resíduo. Em muitos os casos após processo de dessorção térmica o resíduo tratado pode ser destinado a um aterro ou ser reutilizado.

Alba (2007) considera a tecnologia de tratamento mais inovadora para o cascalho de perfuração seja a re-injeção. O processo de re-injeção de cascalho de perfuração é feito pela injeção hidráulica da lama de perfuração numa formação subsuperficial o qual ficará permanentemente isolado e a uma profundidade segura onde uma camada selante impede a propagação do resíduo injetado a superfície. Esta técnica garante que nenhum resíduo de perfuração seja depositado

na superfície e reduz o risco de contaminação durante o transporte. É ideal para exploração *off-shore*, porém ainda possui um custo elevado em comparação com as outras técnicas existentes.

2.4.

Incorporação de resíduos na produção de cerâmica vermelha

A indústria de cerâmica vermelha como se refere o próprio nome é o setor da indústria cerâmica responsável pela produção de materiais de coloração avermelhada empregados na construção civil. Esta indústria é a responsável pela produção de tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos, argilas expandidas e também de utensílios de uso doméstico e de adorno. Segundo os dados da Associação Brasileira de Cerâmica (ABC) de 2003, essa indústria possui no Brasil 7 mil unidades produtoras, as quais geram diretamente 214 mil empregos, com um faturamento de R\$ 4,2 bilhões. Essa indústria é a segunda maior consumidora de massas argilosas, perdendo apenas para a construção civil, e em 2003 consumiu 82 bilhões de toneladas de massa argilosa.

Da natureza deste setor, a qual tem uma demanda por grandes volumes de materiais, essa indústria se apresenta com uma forte potencial de utilização de resíduos incorporados a sua matéria prima, promovendo a reciclagem de resíduos e reduzindo o consumo de sua matéria prima básica. E assim, aumentando a vida útil das jazidas de massas argilosas e a redução do volume de resíduos, os quais muitas vezes são dispostos em aterros.

A matéria-prima utilizada na produção de cerâmica vermelha é bastante heterogênea, essa possui uma variedade de minerais e argilominerais que produz um aspecto e propriedades tecnológicas diferenciadas do produto acabado. A incorporação de resíduos no processo produtivo de cerâmica vermelha, a depender das características desses, é de fácil implementação, e sendo introduzida na planta industrial, não modificaria a estrutura do processo cerâmico.

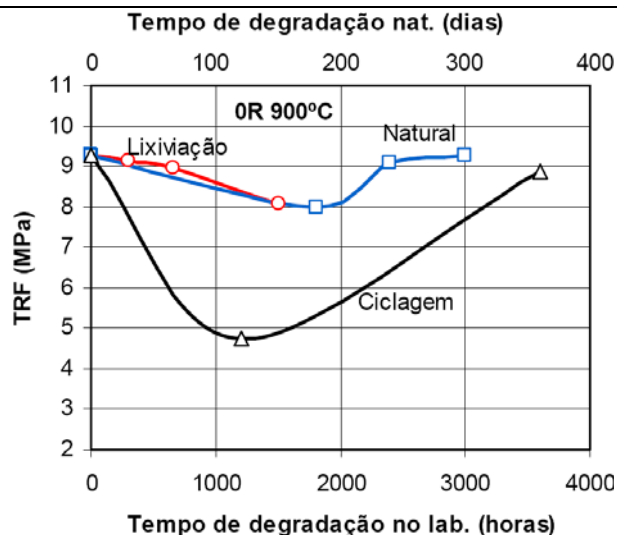
Neste cenário, estão disponíveis na literatura diversos trabalhos a respeito de incorporação de resíduos na produção industrial cerâmica. Entretanto a incorporação desses resíduos, em quase toda a sua totalidade se dá pela adição de resíduos inertes. A utilização de resíduos não inertes ou até mesmo resíduos perigosos ainda é restrito.

De acordo com Xavier *et al* (2005) é importante ressaltar que a massa cerâmica consegue absorver vários tipos de materiais, sendo que cada material pode ter variações no produto final, esses devem ser cuidadosamente avaliados e tratados para fins de aceitação na comunidade científica e comercial.

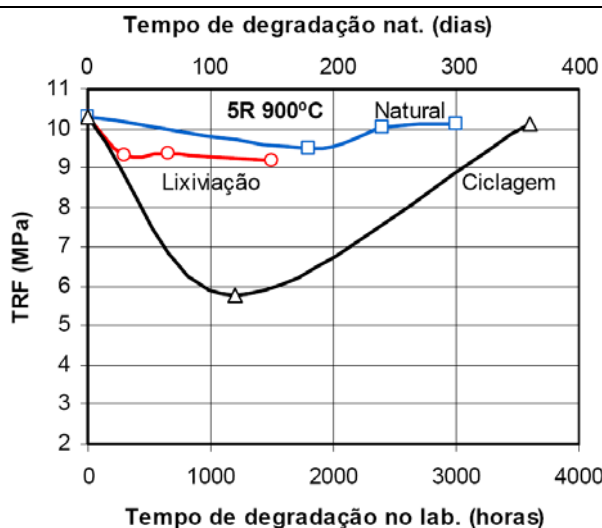
Xavier *et al.* (2005) utilizou resíduo de granito incorporado a massa argilosa para produção de cerâmica vermelha. Onde experimentalmente foi simulada a degradação para avaliação da durabilidade das peças cerâmicas produzidas. Para isso, foram realizados ensaios de lixiviação acelerada, ensaios de ciclagem de umedecimento e secagem, e ambos ensaios comparados a degradação natural. Neste trabalho foram utilizados 5% e 10% de resíduo adicionado a massa argilosa, e foram avaliados para diferentes temperaturas de queima. Os resultados foram satisfatórios, sendo que os materiais incorporados com 5% de resíduo tiveram maior durabilidade que os materiais produzidos sem a incorporação de resíduo, para a temperatura de queima de 900°C. A Figura 2-12 apresenta os resultados de tensão de ruptura a flexão com o tempo de degradação para as peças cerâmicas produzidas com adição de resíduo de granito. Onde na Figura 2-12(a) apresenta os resultados sem adição de resíduo, e as Figuras 2-12(b) e 2-12(c) mostram os resultados das peças produzidas com 5% e 10% de resíduo de granito.

Mothé Filho *et al.* (2001) também estudaram as propriedades térmicas e mecânicas da incorporação de resíduo de granito em 5% e 10% na massa cerâmica. Os resultados mostraram que a resistência mecânica da peça comercial foi de 1,4 MPa, enquanto que com 5% e 10% de rejeito incorporado foi de 2,5 MPa e 2,1 MPa respectivamente.

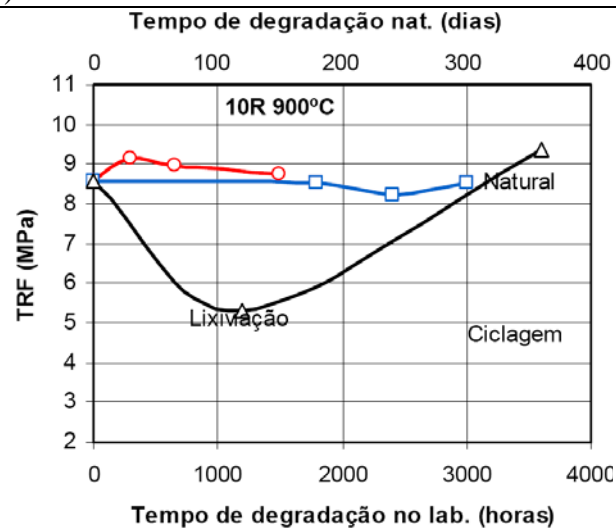
Domínguez (1996) atesta a viabilidade de utilização de resíduos sólidos gerados por fábricas de pelletização de minério de ferro. Estas fábricas produzem cerca de 27 mil toneladas de resíduo por ano na Argentina, e empregam este resíduo incorporado na massa cerâmica a 20%. Segundo o autor, o processo produz “tijolos ecológicos” de boa qualidade com emissão de gases perigosos dentro dos limites aceitáveis.



(a)



(b)



(c)

Figura 2-12 – Resultados de degradação de peças cerâmicas incorporadas com resíduo de granito (Xavier, 2005).

A utilização de resíduos da indústria de petróleo adicionados a massa argilosa para produção de cerâmica vermelha foi estudada por Alves (2005). Em seus experimentos foram utilizados solos já utilizados na indústria cerâmica no estado de Sergipe, onde as borras foram adicionadas à massa para confecção dos blocos cerâmicos nos percentuais de 0% (testemunha), 5%, 10%, 15%, 20% e 25% em relação ao peso total da massa de argila.

As análises realizadas nos blocos cerâmicos produzidos com incorporação de borra oleosa em teores variando de 0 a 25% em peso mostraram que a resistência mecânica é inversamente proporcional ao aumento do teor de borra incorporada. O estudo ainda constatou que o aumento da absorção de água é diretamente proporcional ao aumento do teor de borra incorporada, que há

formação de eflorescência nos blocos para todos os níveis de incorporação e que o aumento do teor de sais solúveis no material resultante é diretamente proporcional ao aumento do teor de borra incorporada limitando a incorporação de borra oleosa em até 20% em peso.

Alves (*op. cit.*) ainda constatou que não houve lixiviação dos principais metais pesquisados em concentrações superiores aos limites máximos permitidos pela norma brasileira NBR-10.004. A autora sugere que os tijolos fabricados com a incorporação de cascalho de perfuração não são prejudiciais ao meio ambiente e à saúde dos usuários. Não obstante a esta premissa, os resultados dos ensaios de solubilização realizados com os materiais permitiram classificá-los como resíduos Classe II-A (não inertes). Análises realizadas com os extratos do material solubilizado, vistas na Tabela 2-3, resultaram em valores superiores aos limites máximos permitidos na NBR 10.004 para sulfato, bário e arsênio.

Tabela 2-3 – Valores determinados no extrato solubilizado por Alves *et al.* (2005).

Metais	Amostra Controle	Localidade						LMP
		Nova Magalhães	Santa Bárbara					
			5%	10%	15%	20%	25%	
Nitrato (mg/L)	ND	-	0,13	0,0043	0,0016	0,0043	0,0136	10
Cloreto (mg/L)	0,7	23,133	14,63	31	104,39	20,28	140,89	250
Sulfato (mg/L)	12	430*	227,66	282,66	563,66*	356,33	1079,33*	400
Ferro (mg/L)	0,02	ND	0,03	ND	ND	ND	ND	0,3
Sódio (mg/L)	2,0	8,20	6,53	16	50,66	7,666	14,33	200
Alumínio (mg/L)	-	-	0,09	ND	ND	ND	ND	0,2
Prata (mg/L)	ND	-	ND	ND	ND	ND	ND	0,05
Bário (mg/L)	0,15	0,056	0,053	1,76*	3,73*	2,266*	6,066*	1,0
Arsênio (mg/L)	ND	-	ND	0,0546*	0,0066	0,0513*	0,0166	0,05
Fluoreto (mg/L)	0,4	0,50	0,466	0,666	0,1666	0,166	0,3	1,5

Nos resultados apresentados pelos autores, destaca-se que os valores das concentrações de sulfato de bário encontradas sejam possivelmente oriundas pela contaminação do fluido de perfuração ao material escavado, uma vez que o fluido de perfuração independente de sua base, óleo, água ou sintético, possui elevadas concentrações de bário e sulfatos.

Dias *et al.* (2000) avaliaram a utilização de borra oleosa na produção de blocos cerâmicos. Neste trabalho foi determinado experimentalmente as propriedades térmicas de cerâmicas vermelhas com 5%, 10%, 15% e 20% de borra oleosa incorporada a massa argilosa em temperaturas de queima variando entre 650°C e 1150°C. Através de ensaio fotoacústico foi medida a condutividade

térmica das amostras padrão e com adição de borra de petróleo. Os resultados mostraram maior condutividade térmica na amostra com 5% de resíduo por apresentar fases metálicas encapsuladas envolvidas pela massa cerâmica.

A adição de Resíduo perigoso Classe I, de acordo com a NBR 10.004 – Classificação de Resíduos, na adição a massas argilosas para produção de cerâmica vermelha foi estudada por Balaton *et al.*(2002). Em seu trabalho foi avaliado a adição de resíduos sólidos galvânicos na produção de cerâmica vermelha. Os resíduos sólidos galvânicos representam um encargo vultoso para empresas responsáveis por sua geração e disposição. Os resíduos galvânicos possuem componentes em altas concentrações que trazem riscos ao meio ambiente quando estocados ou descartados inadequadamente. O resíduo é composto por metais utilizados no processo de galvanização, decantados por um aditivo a base de ferro. Para que os componentes constituintes desta lama galvânica fossem inertizados, a lama foi introduzida em massa de cerâmica vermelha. O estudo apresenta a influência desta lama galvânica nas propriedades físicas dos produtos cerâmicos, realizando-se ensaios nos produtos secos e queimados. Avaliaram-se os riscos ambientais da incorporação desta lama, rica em metais pesados, mediante testes de lixiviação e solubilização nos produtos cerâmicos após serem submetidos à queima. Os resultados demonstraram a viabilidade técnica para a incorporação de resíduo sólido galvânico em massas de cerâmica vermelha.

Balaton *et al.* (2002) sugere que a capacidade de troca catiônica dos materiais argilosos favorece a inertização de resíduos. As propriedades coloidais destes materiais faz com que os metais, encontrados na forma de íons, sejam adsorvidos pela camada dupla das partículas de argila. No entanto, este processo não garante a imobilização dos íons, fazendo-se necessária à realização dos ensaios de lixiviação e solubilização no produto após a adição do resíduo ao material argiloso e sua posterior queima. Ressalta-se ainda que o processo térmico pode potencializar as reações químicas entre os metais da lama e os demais componentes da massa, gerando novos sub-produtos (*e.g.*, dioxinas e furanos).

Em seu programa experimental, Balaton *et al.*(2002) realizou uma série de testes de lixiviação e solubilização na massa argilosa com 2% de resíduo lavado, após a sua queima a 900°C. Os resultados mostraram que houve inertização dos metais, pois as concentrações dos extratos do solubilizado e do lixiviado

apresentaram valores dos elementos e compostos listados nos Anexos F e G da norma NBR-10.0004 abaixo do limite máximo permitido. No entanto, a quantidade de óxido de ferro encontrada nos extratos ficou acima do valor máximo permitido. Ressalta-se que este composto apresenta uma alta concentração na matéria prima.

A Figura 2-13 mostra que os valores de tensão de ruptura das peças cerâmicas, não obstante o teor de incorporação, foram superior às peças modeladas sem a adição de resíduo galvânico.

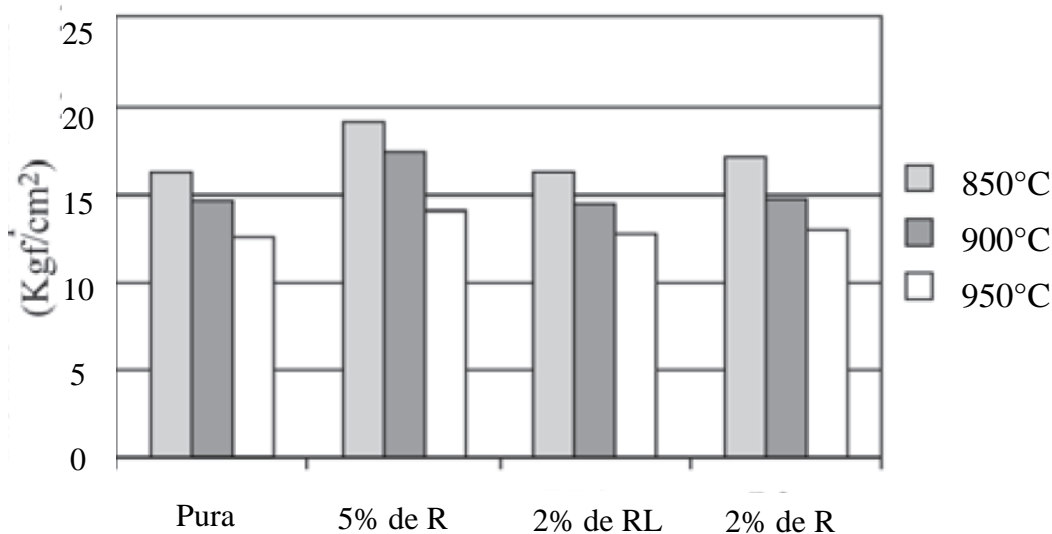


Figura 2-13 – Tensão de ruptura a flexão para peças cerâmicas incorporadas com resíduo galvânicas. Balaton *et al.*(2002).

Conforme pode ser visto na Figura 2-13, a incorporação de 5% de resíduo à massa argilosa, apresentou valores de tensão de ruptura a flexão superiores aos valores encontrados para as peças produzidas com as massas argilosas sem adição de resíduo. Observa-se que menores teores de incorporação de resíduos tiveram valores de tensão de ruptura a flexão inferiores ao encontrados para 5% de adição de cascalho não obstante a temperatura de queima.

Modesto *et al.*(2003) estudou a incorporação de resíduo da própria indústria cerâmica em seu processo produtivo. As matérias-primas e massas obtidas, depois de adequado processamento, foram caracterizadas do ponto de vista físico e químico e, em uma etapa posterior, compactadas para a obtenção de corpos de prova. Os corpos de prova obtidos, após aplicação de ciclo de queima em forno a rolos, foram caracterizados considerando propriedades típicas de produtos

cerâmicos acabados. Segundo os autores, os resultados mostram que as massas consideradas neste trabalho atendem os requisitos das normas de certificação de produtos cerâmicos acabados sendo potenciais candidatas a obtenção de pavimentos cerâmicos “ecológicos” com propriedades e custos reduzidos.