

Instalações Térmicas

3º ano 6º semestre

Aula 13



Aula 13: Materiais de construção de fornos. Características, resistência térmica e critérios de escolha

Tópicos

- **Refractários**
- **Tijolo Refractário**
- **Tipos de Tijolos Refractários**
- **Materiais Isolantes**
- **Instalação de Refractários**





13. Materiais de construção de fornos. Características, resistência térmica e critérios de escolha

13.1. Refractários

- Todo o material pode ser um refractário se puder suportar a acção de sólidos, líquidos ou gases abrasivos ou corrosivos a altas temperaturas.
- As várias condições de operação dos refractários, tornam necessário produzir uma série de materiais com propriedades diferentes. Os materiais refractários são feitos de várias combinações e em formas variadas, dependendo da sua aplicação.





13.1. Refractários

- As exigências gerais de um material refractário são:
 - Resistir à altas temperaturas;
 - Resistir à variação repentina de temperaturas;
 - Resistir à acção da escória do metal fundido, do vidro, dos gases quentes, etc.;
 - Resistir à carga em condições de serviço;
 - Resistir as forças abrasivas da carga;
 - Conservar o calor;
 - Ter baixo coeficiente de expansão térmica;
 - Não se deixar contaminar pelo material com que entram em contacto.

13.1. Refractários

Dependendo da aplicação que pode ser em caldeiras, fornalhas, fornos etc., que se encontram a diferentes temperaturas e atmosferas são usados diferentes tipos de refractários.

Propriedade	Alta Massa Térmica (Refractários de alta densidade)	Baixa Massa Térmica (Fibra cerâmica)
Condutividade Térmica (W/m K)	1,2	0,3
Calor específico (J/kg K)	1000	1000
Massa específica (kg/m ³)	2300	130



13.1. Refractários



Forno de material refractário



13.1. Refractários



Forno de material refractário



13.1. Refractários

Ponto de Fusão

As substâncias puras fundem imediatamente a uma temperatura específica. A maioria dos materiais refractários consiste de partículas ligadas que têm temperaturas de fusão elevadas. A altas temperaturas, estas partículas derretem e transformam-se em escória. O ponto de fusão do refractário determina-se pela temperatura a que uma pirâmide de teste (cone) não suporta mais o seu peso próprio.



13.1. Refractários

Cones pirométricos

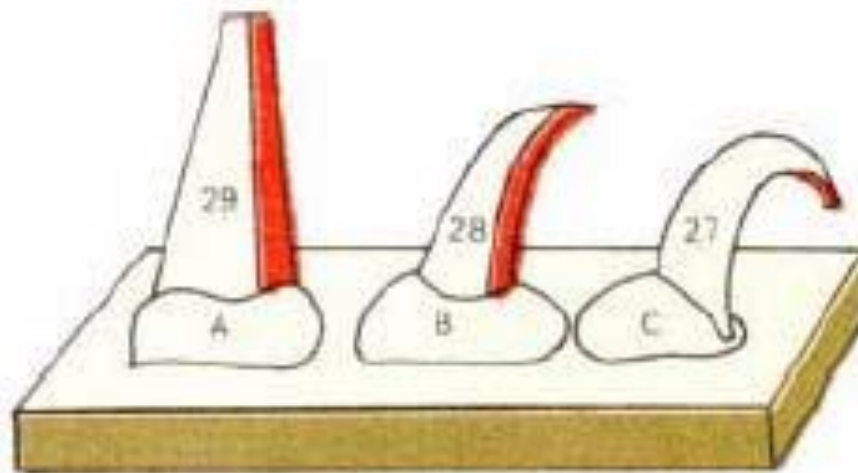
Os refractários de tijolos têm uma temperatura a qual se dobram a custa do seu peso próprio por perderem a sua sustentação. Os cones pirométricos são usados nas indústrias cerâmicas para testar os refractários de tijolo. Consistem de uma mistura de óxidos que são produzidos para derreterem à uma temperatura específica. Os cones com diferentes composições de óxido, são colocados em ordem de temperatura de fusão, um ao lado de outro, em fila numa fornalha.



13.1. Refractários

Cones pirométricos

A fornalha é aquecida e ao subir a temperatura regista-se a temperatura a qual o cone verga, esta é a temperatura acima da qual o refractário não pode ser usado. Esta temperatura é conhecida como temperatura pirométrica equivalente do cone.



13.1. Refractários

Resistência Térmica

É uma propriedade dependente do tempo, que determina a deformação a um dado tempo e a uma dada temperatura do refractário sob tensão.

Durante a vida útil dos refractários pode ocorrer a contracção ou a expansão dos mesmos. Tais alterações permanentes nas dimensões podem ser devido:

- Às alterações alotrópicas das formas, que causam alterações na gravidade específica;



Resistência Térmica

- Às reacções químicas que produzem um novo material com gravidade específica alterada;
- À formação da fase líquida;
- Às reacções de sintetização;
- À areia fundida ou escória, ou pela acção dos alcalóides da argila refractária, que formam silicatos de alumínio. Isto é geralmente observado nos alto-fornos.



13.1. Refractários

Expansão térmica reversível

- Todo o material expande quando aquecido, e contrai-se quando arrefecido. A expansão térmica reversível é uma reflexão das transformações de fase que ocorrem durante o aquecimento e arrefecimento.



13.1. Refractários

Condutibilidade Térmica

A condutibilidade térmica depende da composição química e mineralógica e da sílica contida no refractário como também da temperatura de utilização. A condutibilidade geralmente varia com a elevação da temperatura. Uma condutibilidade térmica elevada de um refractário é desejável quando se pretende uma dissipação de calor pelas paredes do forno, por exemplo nos recuperadores, regeneradores, muflas, etc...



13.1. Refractários

Condutibilidade Térmica

A baixa condutibilidade térmica é necessária para a conservação de calor. Nesses casos os refractários actuam como um isolador. Isolamento adicional conserva o calor mas aumenta ao mesmo tempo a temperatura da superfície, daí ser desejável um refractário de melhor qualidade. Por esta causa, os telhados exteriores das fornalhas de forno aberto não são normalmente isolados, porque isto poderia fazer com que o telhado desabasse.



13.1. Refractários

Condutibilidade Térmica

Os refractários leves, de baixa condutibilidade térmica, têm maior aplicação em fornos de tratamento térmico de baixa temperatura, por exemplo no tipo de fornos onde o calor específico da estrutura refractária é baixo e minimiza o calor armazenado durante os ciclos de aquecimento e arrefecimento intermitentes.



13.1. Refractários

Condutibilidade Térmica

- Os refractários isolantes têm condutibilidade térmica muito baixa. Isto é conseguido geralmente mantendo uma grande parte de ar na sua estrutura. Alguns exemplos são:
 - Os materiais naturais como o asbesto que são bons isolantes mas não são particularmente bons refractários;
 - As lãs minerais que combinam as propriedades de bom isolante com a boa resistência ao calor, mas estas não são rígidas;
 - Os tijolos porosos que são rígidos a altas temperaturas e têm uma condutibilidade térmica razoavelmente baixa.



13.1. Refractários

Tamanho

O tamanho e a forma dos refractários, fazem parte do projecto da fornalha, pois afectam a estabilidade da estrutura dela. O tamanho exacto é extremamente importante para que o revestimento refractário caiba por completo dentro da fornalha e minimize o espaço entre as junções da construção.



Densidade

A densidade é a propriedade mais útil dos refractários, que é a quantidade de material refractário que cabe num volume em (kg/m^3). Um aumento na densidade de um dado refractários aumenta sua estabilidade volumétrica, a sua capacidade calorífica e a resistência à penetração da escória.



13.1. Refractários

Porosidade

A porosidade aparente é a quantidade de poros abertos, nos quais um líquido pode penetrar, como uma percentagem do volume total do refractário. Esta propriedade é importante quando o refractário está em contacto com carga e escória derretidos. Uma porosidade aparentemente baixa impede que o material derretido penetre no refractário. Um grande número pequenos poros é geralmente preferível a um número pequeno de poros grandes.



13.1. Refractários

Tensão de esmagamento a frio

A tensão de esmagamento a frio é a resistência do refractário à destruição, que acontece na maioria das vezes durante o transporte. Tem somente uma relevância indirecta, quanto ao desempenho do refractário e é usada como um dos indicadores da resistência à abrasão. Os indicadores mais usados são densidade e a porosidade.

Os refractários podem ser classificados na base da composição química, no seu destino e nos métodos de sua produção.



13.1. Refractários

Classificação dos Refractários

Método de Classificação	Exemplo
Composição Química	
ACIDO, que raramente combina com bases	Silica, Semi-silica, Aluminosilicate
BASICO, que consiste maioritariamente de óxidos metálicos que resistem às acções de bases.	Magnesite, Cromo-magnesite, Magnesite-chromite, Dolomite
NEUTRO, que não combinam com ácidos nem com bases	Tijolos refractários, Cromo, Alumina pura
Especiais	Carbono, Carbide Silicon, Zirconia
Uso final	Alto fornos, moldados manualmente
Método de fabrico	Processo de secagem a pressão, moldação manual, fundidos ou quimicamente ligados, imaturos (monolíticos, plásticos, pulverização)



13.2. Tijolo refractário



O Tijolo refractário a base de argila refractária é a forma mais comum de material refractário. É usado extensivamente na indústria de aço, metalurgia não ferrosa, na indústria de vidro, nos fornos de cerâmica, na indústria de cimento, e em muita outra. Os refractários do tipo tijolo, argila refractária, sílica e os refractários aluminosos de argila consistem em silicatos de alumínio com índice variado de sílica (SiO_2).



13.2. Tijolo refractário

A sílica pode atingir até 78 por cento enquanto o Al_2O_3 até 44 por cento. O ponto de derretimento do tijolo refractário baixa com o aumento das impurezas e diminuição de Al_2O_3 . Este material é usado frequentemente nos fornos e nos fogões porque estes materiais abundam e são relativamente baratos.



13.3. Tipos de Tijolos Refractários

Tipo de Tijolo	Percentagem S_iO_2	Percentagem Al_2O_3	Percentagem de outros constituintes	Ponto de Fusão °C
Extra responsabilidade	49-53	40-44	5-7	1745-1760
Alta responsabilidade	50-80	35-40	5-9	1690-1745
Intermédia	60-70	26-36	5-9	1640-1680
Alta (Selício) responsabilidade	65-80	18-30	3-8	1620-1680
Baixa responsabilidade	60-70	23-33	6-10	1520-1595



13.3.1. Refractários de elevado teor de alumínio



Os refractários de silicato de alumínio que contêm mais de 45 por cento de alumínio são geralmente denominados materiais de elevado teor de alumínio. A concentração de alumínio varia de 45 a 100 por cento. A refractariedade dos refractários de elevado teor de alumínio aumenta com o aumento da percentagem de alumínio.

A utilização de refractários de elevado teor de alumínio inclui os fornos rotativos, os alto-fornos, os fornos cerâmicos, os fornos de cimento, os tanques de vidro e os cadinhos para fundir uma grande variedade de metais.



13.3.2. Tijolo de sílica

O tijolo de sílica é um refractário que contém pelo menos 93 por cento SiO_2 . A matéria prima para a sua produção são as rochas de qualidade. Várias classes de tijolo de sílica têm uso extensivo na indústria de ferro, nos fornos de fusão de aço e na indústria de vidro. Para além do elevado ponto de fusão, as outras propriedades importantes são a sua elevada resistência ao choque térmico e a sua elevada refractáriedade.

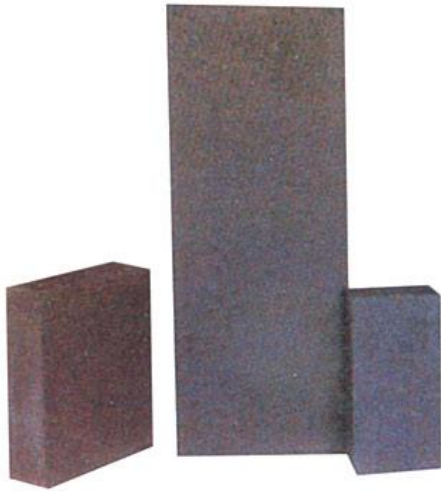


13.3.2. Tijolo de sílica

A propriedade proeminente do tijolo de sílica é que não cede sob cargas elevadas até que o seu ponto de fusão esteja próximo de ser atingido. Este comportamento contrasta com o de muitos outros refractários, como os materiais de silicato de alumínio por exemplo, que começam a vergar à temperaturas consideravelmente muito inferiores aos seus pontos da fusão.



13.3.3. Refractários de Magnesite



Os refractários de magnesite são materiais quimicamente básicos, contendo pelo menos 85 por cento de óxido do magnésio. São feitos de magnesite natural ($MgCO_3$). As propriedades dos refractários de magnesite dependem da concentração da liga de silicato e da temperatura de operação.

A magnesite de boa qualidade resulta geralmente de uma relação $CaO-SiO_2$ de menos de dois com uma concentração mínima do ferrite, particularmente se as fornalhas revestidas com o refractário operarem em condições de oxidação e de redução. A resistência à escória é muito elevada particularmente às escórias ricas em cal e ferro.



13.3.4. Refractários de Cromite

- Existem dois tipos distintos de refractários de cromite:
 - Refractários do Cromo-magnesite, que contêm geralmente 15-35 por cento Cr_2O_3 e 42-50 por cento de MgO . São feitos em uma larga escala de qualidades e são usados para construir as peças críticas de fornalhas de alta temperatura. Estes materiais podem suportar escórias e gases corrosivos e ter uma refractariedade elevada;



13.3.4. Refractários de Cromite



- Refractários de Magnesite-chromite, que contêm pelo menos 60 por cento de MgO e 8-18 por cento Cr_2O_3 . São apropriados para funcionar às mais altas temperaturas e para o contacto com as escórias mais básicas usadas na fusão de aço.
- A Magnesite-chromite tem geralmente uma melhor resistência a fragmentação que o Cromo-magnesite.



13.3.5. Refractários de Zirconia

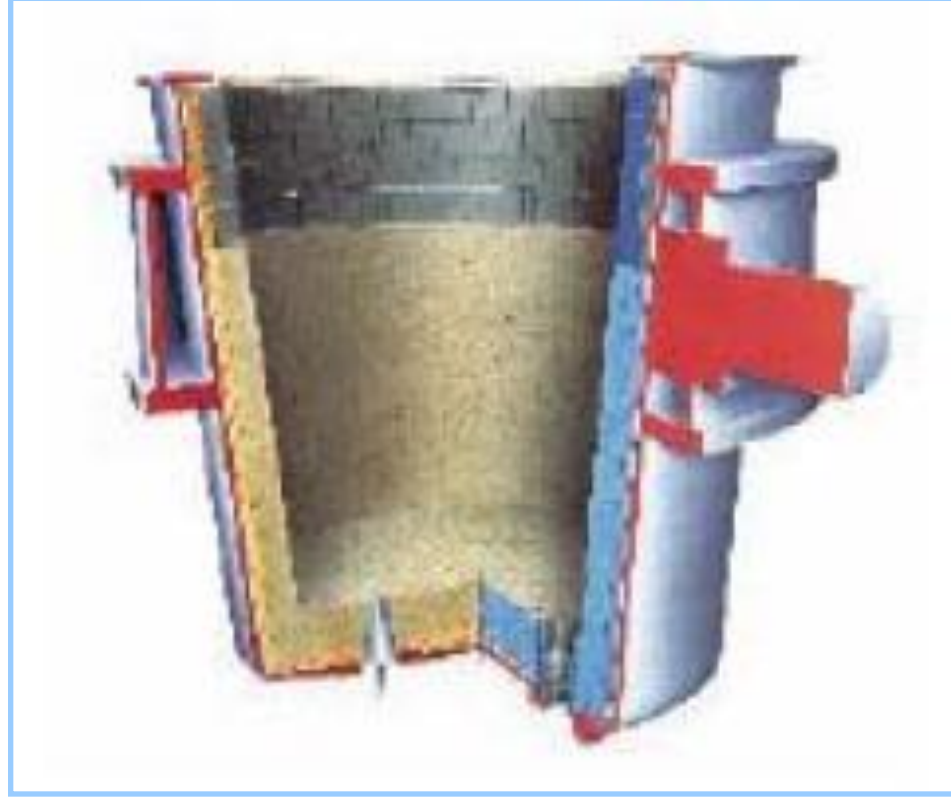


O dióxido do zirconio (ZrO_2) é um material polimorfo. É necessário estabilizá-lo antes da sua aplicação como refractário, o que é conseguido incorporando quantidades pequenas de óxido de cálcio, de magnésio, de cério, etc.. Suas propriedades dependem principalmente do grau de estabilização, da quantidade de estabilizador e da qualidade da matéria prima original. Os refractários de Zirconia têm uma resistência muito elevada à temperatura que se mantém até temperaturas elevadas na ordem de $1500^{\circ}C$.

13.3.5. Refractários de Zirconia



São consequentemente úteis como materiais de construção de alta temperatura nos fornos metalúrgicos e cerâmicos. A condutibilidade térmica do dióxido do zirconio é muito mais baixa que a da maioria dos refractários, consequentemente ele é usado como um refractário isolante de alta temperatura. A Zirconia apresenta perdas térmicas muito baixas, não reage com os metais líquidos e é particularmente útil para fazer cadinhos refractários e outros recipientes para finalidades metalúrgicas. Os fornos de vidro usam o zirconia porque não é contaminada facilmente por vidro derretido e não reage facilmente com o vidro.



Cadinho Refractário

13.3.6. Oxido refractário (Alumina)



Os materiais refractários de alumina que consistem no óxido de alumínio com pequenas partículas de impurezas são conhecidos como o alumina pura. A alumina é um dos óxidos conhecidos, mais estáveis quimicamente. É mecanicamente muito resistente, insolúvel na água, no vapor super aquecido, e na maioria ácidos e alcalóides inorgânicos. Suas propriedades tornam-no apropriado para produzir cadinhos para fundir os carbonatos de sódio, o hidróxido de sódio e o peróxido de sódio. Tem uma resistência elevada à oxidação e à redução na atmosfera. A alumina é amplamente usada nas indústrias térmicas. A alumina é altamente porosa e é usada para o forro de fornalhas que operam até 1850°C.

13.3.7. Monolíticos



Os refractários monolíticos são usados em moldes de único corpo de equipamento metalúrgico, tal como a colher de fundição. Estão substituindo rapidamente o tipo convencional de refractários resistentes ao fogo em muitas aplicações, incluindo em fornos industriais. As vantagens principais dos refractários monolíticos são:

- Eliminação das junções que provocam uma perda de resistência;
- Maior rapidez de aplicação;
- Não é requerida uma habilidade especial para sua instalação;
- Facilidade de transporte e manuseamento;
- Melhoria na exploração, diminuindo o tempo para manutenções e reparações;
- Diminuição das perdas de calor;
- Melhor resistência a fractura.

13.3.7. Monolíticos

Os refractários Monolíticos são colocados no lugar por vários métodos, moldagem, aplicação forçada e pulverização de areia. A aplicação forçada requer ferramentas apropriadas e é usada na maior parte em aplicações a frio onde a consolidação apropriada do material é importante. A aplicação forçada é usada também para o ajuste do ar e do calor dos materiais. Como o cimento de alumina de cálcio é pastoso, tem que ser armazenado correctamente para impedir a absorção da humidade. A sua resistência começa deteriorar-se após 6 a 12 meses de utilização.



13.4. Materiais Isolantes

Os isolamentos servem para reduzir as perdas de calor através das paredes. O isolamento é feito por meio de uma camada de material com baixa condutividade de calor entre a superfície quente interna de um forno e a superfície externa, assim mantendo a temperatura baixa da superfície externa. Os materiais de isolamento podem ser classificados nos seguintes grupos:

- Tijolos de isolamento;
- Isolamento moldável;
- Fibra cerâmica;
- Silicato do cálcio.



13.4. Materiais Isolantes



Os materiais de isolamento de revestimento cerâmico devem a sua baixa condutividade a seus poros enquanto sua capacidade calorífica depende da densidade e do calor específico. Os materiais isolantes de ar consistem em poros minuciosamente enchidos com o ar, que têm uma condutividade térmica muito baixa. O calor excessivo afecta adversamente todo o material do isolamento, mas as temperaturas a que isso ocorre varia numa grande faixa. Consequentemente a escolha de um material isolante deve ser baseada na sua capacidade de resistir à condução de calor e na mais alta temperatura suportada.

13.4. Materiais Isolantes

Um dos materiais isolantes mais usados é a diatomite, que consiste numa massa constituída de plantas aquáticas fossilizadas há milhares de anos depositadas em camadas no mar e em lagos. Sua composição química é à base de sílica contaminada com a argila e matéria orgânica. Uma gama larga de isolamentos refractários com muitas combinações das suas propriedades encontra-se disponível no mercado.



13.4. Materiais Isolantes

Tipo	Condutibilidade térmica a 400 °C	Temperatura máxima de uso (°C)	Tensão de esmagamento a frio (kg/cm ²)	Percentagem de porosidade	Densidade
Diatomite Solida	0,025	1000	270	52	1090
Diatomite Prosa	0,014	800	110	77	540
Argila	0,030	1500	260	68	560
Alumina Alta	0,028	1500-1600	300	66	910
Silica	0,040	1400	400	65	830

13.4.1. Concretos



Os forros monolíticos de secções da fornalha podem ser construídos em cimento de isolamento refractário, com agregados leves nos lugares apropriados das ligações. Outras aplicações incluem as bases dos carros dos fornos de túnel, usados na indústria cerâmica. Os ingredientes são similares aos materiais de isolamento usados para refractários, com a diferença de que os concretos contêm Portland ou cimento de elevada-alumina.

13.4.2. Fibra cerâmica



A fibra cerâmica é um material maciço de isolamento, com baixo coeficiente de condutibilidade térmica, que revolucionou os sistemas de projecto de revestimento de fornos.

A fibra cerâmica é produzida misturando e fundindo a alumina e a sílica a uma temperatura de 1800 - 2000°C. As fibras são produzidas geralmente em duas classes de temperatura baseadas no índice Al_2O_3 . Um produto novo é a fibra de ZrO_2 adicionada do silicato de alumino, que ajuda a reduzir níveis de contracção térmica e desse modo, torna-a apropriada à temperaturas mais altas. A temperatura de operação contínua recomendada para fibras é dada na tabela seguinte:

13.4.2. Fibra cerâmica

Temperatura	Al ₂ O ₃	SiO ₂	ZrO ₂
1150°C	43-47 por cento	53-57 por cento	
1250°C	52-56 por cento	44-48 por cento	
1325°C	33-35 por cento	47-50 por cento	17-20 por cento

As fibras cerâmicas geralmente são produzidas de lãs e cozidas numa massa de várias densidades que variam de 64 a 190 kg/m³. Os produtos acabados de 40 formas diferentes são feitos no formato de cobertores, para servir as várias exigências de mercado. As características das fibras cerâmicas são uma combinação das propriedades notáveis dos refractários e do material tradicional de isolamento.



13.4.2. Fibra cerâmica



Devido à sua baixa condutibilidade térmica (0,1 kcal/m por hora por °C a 600°C para um cobertor com densidade 128 kg/m³) é possível construir forros mais delgados com a mesma eficiência térmica que com refractários convencionais. Devido ao forro ser mais fino, o volume da fornalha torna-se mais elevado. É 40 por cento mais eficaz do que o tijolo refractário de boa qualidade e 2,5 vezes melhor do que o asbesto. A fibra cerâmica é um isolador melhor do que o silicato de cálcio.

13.4.2. Fibra cerâmica



A densidade média da fibra cerâmica é 96 kg/m^3 . É um décimo do peso do isolamento de tijolo e um terço do peso de placas do silicato de asbesto/cálcio. Para fornalhas novas as sustentações estruturais podem ser reduzidas em 40 por cento.

Os forros de fibra cerâmica absorvem menos calor por causa da sua densidade mais baixa. As fornalhas podem conseqüentemente ser aquecidas e arrefecidas a taxas mais rápidas. Tipicamente o calor armazenado num sistema do forro de fibra cerâmica está na escala de $2700 - 4050 \text{ kCal/m}^2$ ($1000 - 1500 \text{ Btu/Ft}^2$) em comparação com $54200-493900 \text{ kCal/m}^2$ ($20000 - 250000 \text{ Btu/Ft}^2$) dos sistemas convencionais.

13.4.2. Fibra cerâmica

- Os forros da fibra cerâmica resistem ao choque térmico devido a sua matriz resiliente. Isto permite também ciclos de aquecimento e arrefecimento mais rápidos, melhorando deste modo a disponibilidade da fornalha e a produtividade.
- A fibra cerâmica tem resistência química maior ao ataque químico e não é afectada pelos hidrocarbonetos, água e pelos gases de combustão presentes.
- A fibra cerâmica tem elevada resistência mecânica o que torna possível manufacturar os painéis de fibra fora das fornalhas, transportá-los e montar sem o risco de danos.



13.4.2. Fibra cerâmica

- A aplicação de fibras cerâmicas é um processo estandardizado, nenhuma habilidade especial são requeridas. Os forros de fibra não requerem nenhum processo externo de secagem ou grande tempo de cura e não há nenhum risco de rachar ou de fracturar quando aquecidas após a instalação.
- Caso haja danos físicos, a secção da fibra cerâmica danificada pode ser rapidamente removida e substituída por uma parte nova. Secções inteiras do painel podem ser pré-fabricadas para uma rápida instalação.



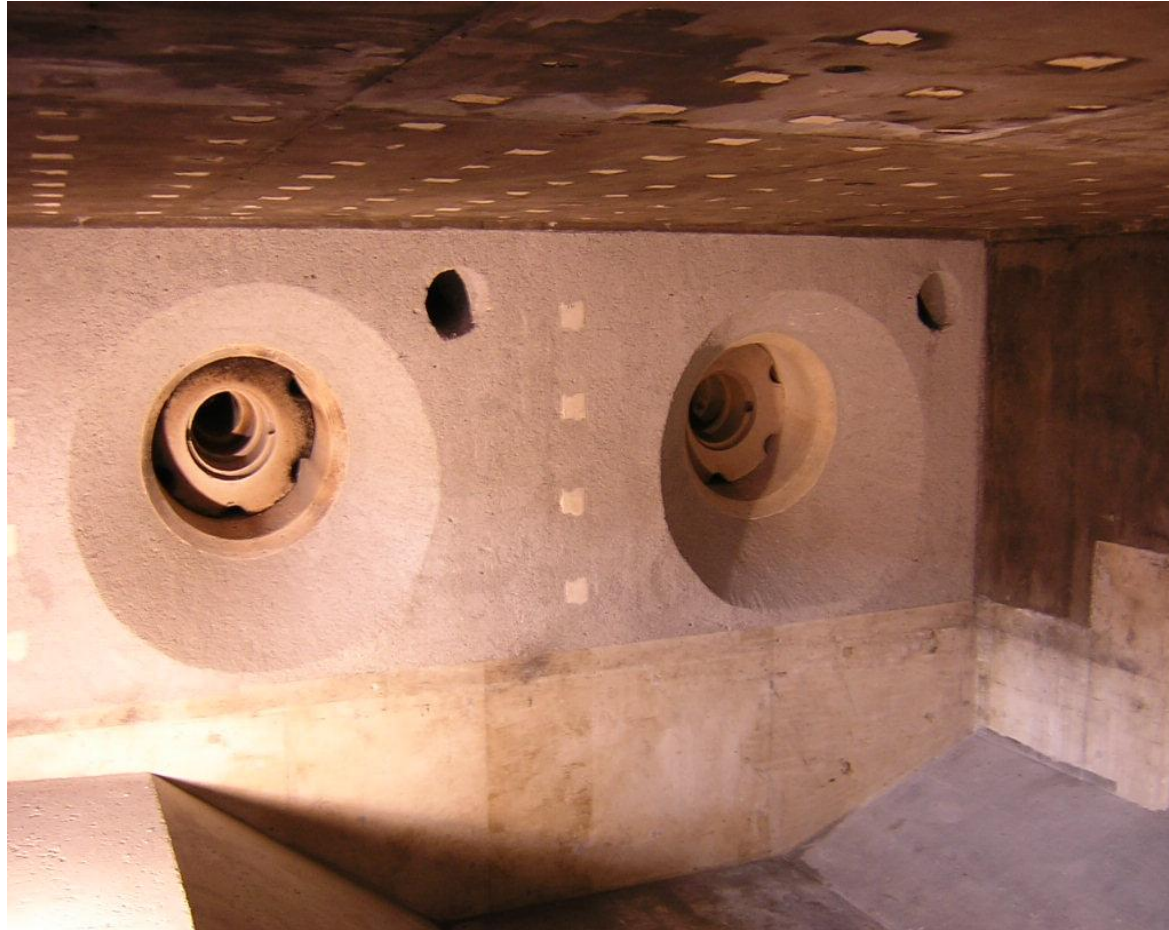
13.4.2. Fibra cerâmica

- Todos as formas do produto são facilmente asseguradas e podem rapidamente ser cortadas com uma faca ou uma tesoura. Certa forma de produtos podem requerer o corte com uma serra.



13.5. Instalação de Refractários

23T Tilting Melting Furnace - Norway



13.5. Instalação de Refractários 40T Holding Furnace - UK



13.5. Instalação de Refractários 50T Holding Furnace - Australia



13.5. Instalação de Refractários

65T Side well Melting Furnace - UK

Prof. Doutor Eng° Jorge Nhambiu ◊ Instalações Térmicas

