



CONCRETO MANUAL SIKA CONCRETO PROJETADO

BUILDING TRUST



Manual Sika Concreto Projetado

PREFÁCIO

Concreto projetado é um material de rápido endurecimento (ganho de resistências mecânicas) que é aplicado sem o uso e dependência de formas na estabilização e reparo de estruturas. É provavelmente uma das mais sofisticadas aplicações de concreto, onde uma perfeita interação entre homem, máquina e concreto é um pré-requisito essencial.

O fator humano, especialmente representado aqui pelo mangoteiro, requer conhecimento técnico e habilidade prática, com experiência e uma grande afinidade para esta tecnologia. O mangoteiro deve, então, ser capaz de confiar completamente na máquina de projeção e no material concreto projetado. É esta interação e a qualidade de cada componente do processo que finalmente determina o sucesso da aplicação do concreto projetado.

Desde a sua primeira edição em 2004, este manual pretende ser útil como uma introdução básica a alguns aspectos fundamentais para a tecnologia do concreto projetado, tão bem como ser um livro conciso de referência para o suporte diário nos projetos e atividades com concreto projetado. Com esta terceira edição, o Manual Sika para Concreto Projetado continua esta tradição com novas atualizações e informações, particularmente relacionadas às matérias-primas e questões de dosagem específicas do concreto projetado.

O objetivo é fornecer ao leitor um guia compreensível dos tópicos mais relevantes e requisitos básicos para aplicações práticas do concreto projetado. Tal guia será útil e fornecerá respostas e assistência às questões cotidianas de trabalho com concreto projetado, sem entrar muito a fundo nos respectivos detalhes científicos.

Editora
Sika Services AG
Tüffenwies 16
CH-8048 Zürich

Autores
Dr. sc. nat. Benedikt Lindlar, Sika Services AG
Dipl.-Ing. FH Markus Jahn, Sika Services AG
Dipl.-Ing. HTL Jürg Schlumpf, Sika Services AG

Tradução e adaptação
MSc. Eng. Igor Torres, Sika Brasil
Cláudio Nogueira, Sika Brasil
Eng. Manfredo Belohuby, Sika LATAM

Layout
Sika Services AG
Corporate Marketing Service

© 2020 by Sika AC
Todos os direitos reservados

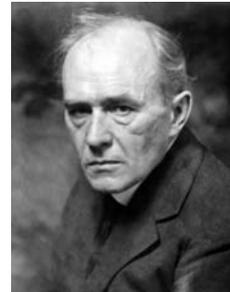
Edição 2021

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| PREFÁCIO | 3 |
| 1 INTRODUÇÃO | 7 |
| 2 USOS DO CONCRETO PROJETADO | 13 |
| 2.1 Estabilização de escavações | 13 |
| 2.2 Revestimento | 16 |
| 3 REQUISITOS DO CONCRETO PROJETADO | 21 |
| 3.1 Sustentabilidade | 21 |
| 3.2 Características básicas da mistura de concreto projetado | 22 |
| 3.3 Aplicação e concreto projetado recém aplicado | 24 |
| 3.4 Concreto projetado maturado | 26 |
| 4. MATERIAIS PARA CONCRETO PROJETADO | 29 |
| 4.1 Agregados | 29 |
| 4.2 Cimento | 31 |
| 4.3 Água | 32 |
| 4.4 Adições | 33 |
| 4.5 Aditivos para Concreto Projetado | 36 |
| 4.5.1 Superplastificante | 37 |
| 4.5.2 Retardador de pega / estabilizador de consistência | 38 |
| 4.5.3 Acelerador de pega e endurecimento para concreto projetado | 38 |
| 4.6 Fibras em concreto projetado | 46 |
| 5 CLASSIFICAÇÃO DO CONCRETO PROJETADO POR MATERIAIS | 51 |
| 5.1.1 Concreto projetado via úmida | 52 |
| 5.1.2 Dosagem do concreto projetado via úmida | 52 |
| 5.1.2.1 Granulometria de agregados | 56 |
| 5.1.2.2 Finos e pasta | 58 |
| 5.1.2.3 Água de amassamento | 61 |
| 5.2. Concreto projetado via seca | 64 |
| 5.2.1 Dosagem de concreto projetado via seca | 64 |
| 5.2.2 Concreto projetado terra úmida | 65 |

| | |
|---|------------|
| 6 CLASSIFICAÇÃO DO CONCRETO PROJETADO POR PROCESSO | 67 |
| 6.1 Processo fluxo denso | 69 |
| 6.1.1 Vantagens | 70 |
| 6.1.2 Equipamentos para processo de fluxo denso | 70 |
| 6.2 Processo fluxo aerado | 71 |
| 6.2.1 Vantagens | 72 |
| 6.2.2 Equipamentos para processo de fluxo aerado | 73 |
| 7 APLICAÇÃO DE CONCRETO PROJETADO | 75 |
| 7.1 Saúde e segurança | 75 |
| 7.1.1 Saúde, Segurança e Meio Ambiente (SSMA) para cimento | 75 |
| 7.1.2 SSMA para mistura base de concreto projetado | 76 |
| 7.1.3 SSMA para aditivos de concreto projetado | 76 |
| 7.1.4 Aplicação com equipamentos pesados | 76 |
| 7.1.5 Concreto projetado para estabilização de escavações | 77 |
| 7.2 Substratos | 77 |
| 7.3 Projeção | 78 |
| 7.4 Configurações de mangote | 82 |
| 7.5 Reflexão | 84 |
| 7.6 Geração de poeira | 85 |
| 7.7 Sombras de spray com telas metálicas | 86 |
| 7.8 Heterogeneidade, laminação e juntas frias | 86 |
| 8 GERENCIAMENTO DE QUALIDADE DO CONCRETO PROJETADO | 89 |
| 8.1 Matérias primas e qualidade do concreto projetado | 89 |
| 8.1.1 Mistura de concreto projetado | 90 |
| 8.1.2. Produção de concreto projetado | 91 |
| 8.2 Controle de qualidade na obra | 92 |
| 8.2.1 Classes de resistência e desempenho de concreto recém projetado | 93 |
| 8.2.1.1 Método da penetração de agulha | 95 |
| 8.2.1.2 Método de penetração das cavilhas (HILTI) | 96 |
| 8.2.1.3 Método da extração de testemunho | 96 |
| 8.3 Controle de qualidade em laboratório | 97 |
| 9 GUIA DE SOLUÇÃO DE PROBLEMAS | 101 |
| 10 NORMAS TÉCNICAS E GUIAS RELATIVOS AO CONCRETO PROJETADO | 103 |
| 11 ÍNDICE | 107 |

1 INTRODUÇÃO



Carl Ethan Akeley (1)

Os primórdios da tecnologia do concreto projetado e seu desenvolvimento datam do início do século XX. Carl Ethan Akeley, um taxidermista americano do Field Museum (Museu de História Natural de Chicago) que tinha construído um aparato para criar paisagens artificiais através da projeção de gesso, posteriormente desenvolveu este dispositivo por volta de 1907 em um funcional transportador de duas câmaras para a aplicação de materiais cimentícios. Em 1911, Akeley recebeu uma patente para este equipamento de projeção, simbolizando o “nascimento” da tecnologia de concreto projetado. Desde então, o concreto projetado tem sido continuamente desenvolvido e melhorado, especialmente nas últimas décadas, tornando-se uma tecnologia construtiva de alta performance que em particular tem mudado drasticamente a construção subterrânea.

Ao longo do século passado, o concreto projetado substituiu os métodos tradicionais de revestimento de túneis e tornou-se um elemento fundamental na estabilização de seções de túneis escavados. Tunelamento moderno sem concreto projetado é impensável. Concreto Projetado é uma denominação simples que abrange vários componentes e processos relacionados a uma complexa tecnologia na construção subterrânea:

- o material de construção
 - um processo de lançamento
 - um sinônimo para um método construtivo
- composição para projeção via seca ou úmida
método de fluxo denso e aerado
ex.: New Austrian Tunneling Method (NATM)

Esses três aspectos definem uma tecnologia completa, que tem uma longa tradição, mas com enorme potencial de inovação e um grande futuro devido a uma crescente demanda global por túneis em todos os tipos de construção subterrânea. O material concreto projetado consiste em um traço de concreto que é determinado pelos requisitos da aplicação e pelos parâmetros especificados. Como regra geral, há normalmente uma redução na dimensão máxima das partículas de agregados, por exemplo, em comparação com o concreto convencional, um aumento do teor de ligantes e o uso de aditivos especiais para concreto projetado para controle de certas propriedades do material.

O concreto projetado pode ser aplicado de duas maneiras diferentes, seja pelo chamado processo de fluxo aerado, ou pelo processo de fluxo denso. No processo de fluxo aerado (Figura 1.1), a mistura de concreto é transportada pneumáticamente, ou seja, é pulverizada através das linhas de tubulações usando ar comprimido.

(1) Library of Congress, Prints & Photographs Division, Washington, D.C., LC-DIC-ggbain-37036

O método de fluxo aerado pode ser utilizado para qualquer material de projeção, desde argamassas úmidas até argamassas secas e, portanto, pode ser usado para:

- Concreto projetado via seca
- Concreto projetado terra-úmida
- Concreto projetado via úmida

O processo de fluxo denso, recentemente desenvolvido (Figura 1.2), é muito semelhante ao clássico concreto bombeado, onde o concreto projetado é bombeado até o bico de projeção e a partir daí é transformado em concreto projetado por meio de ar comprimido. Este processo só é adequado para concreto projetado via úmida.

Em ambos os processos de projeção, a mistura básica de concreto passa pelo bico de projeção a uma velocidade muito alta (cerca de 30 a 40 m/s). O jato é formado e outros componentes relevantes da mistura são adicionados, como a água no concreto projetado via seca, ar comprimido para o processo de fluxo denso e os aceleradores para concreto projetado, se necessário. Posteriormente, a mistura de concreto é projetada contra o substrato à alta velocidade, resultando na formação contínua de uma estrutura de concreto projetado totalmente compacta no substrato. Isso resulta em uma enorme vantagem sobre métodos convencionais de concretagem: concretar sem a utilização de formas.

A elevada energia de impacto do concreto projetado causa uma boa adesão ao substrato. Devido à alta energia cinética do material projetado, inicialmente todo agregado graúdo na primeira camada de aplicação é perdido por reflexão. Desta forma, uma fina camada remanescente de areia e pasta se forma na interface, a qual também é forçada, sob pressão, a preencher pequenas fissuras e vazios na superfície do substrato, criando uma excelente ponte de aderência.



Fig 1.1: Concreto projetado por processo de fluxo aerado

Além do efeito benéfico da reflexão para o alcance de uma ponte de aderência durante a fase inicial de projeção, a reflexão está geralmente associada à perda de materiais e custos indesejados. Portanto, motivações técnicas e econômicas têm levado a limitar o diâmetro máximo dos agregados utilizados no concreto projetado, tipicamente a 8 mm. Uma vez que a energia cinética das partículas aumenta com o cubo de seu raio, agregados maiores são a maior parte desproporcional da reflexão. Limitar o diâmetro máximo da mistura na faixa 0- 8 mm reduz a reflexão, por exemplo, para menos de 10% para concreto projetado via úmida, e o concreto projetado também obtém um acabamento superficial fino e uniforme que pode satisfazer requisitos estéticos e técnicos sem que nenhuma camada fina (também conhecido por gunito) adicional seja necessária, por exemplo, previamente à aplicação de uma membrana impermeável na construção do túnel.

A tecnologia do Concreto Projetado tem sido ainda mais desenvolvida e melhorada significativamente nas últimas décadas. Com relação aos volumes de concreto projetado, os mercados e a tecnologia têm mudado da projeção via seca para a projeção via úmida. No entanto, isso não significa que a projeção via úmida mais moderna substituirá o método mais antigo de projeção à seco, já que ambos foram desenvolvidos para diferentes aplicações e requisitos. Nos últimos anos, os dois métodos têm sido posicionados lado a lado. Como o equipamento de fluxo aerado é muito menor e mais fácil de operar, a projeção via seco é usada principalmente para a aplicação de menores volumes, por exemplo, em reparos e obras especiais, como na construção de piscinas ou nas chamadas “earth houses”. A projeção via úmida, por outro lado, é predominantemente usada em túneis e mineração, onde grandes quantidades de concreto projetado precisam ser aplicadas em pouco tempo, por exemplo, para estabilização de rochas. As máquinas típicas de projeção via fluxo denso têm uma capacidade nominal de projeção de até 30 m³ por hora.

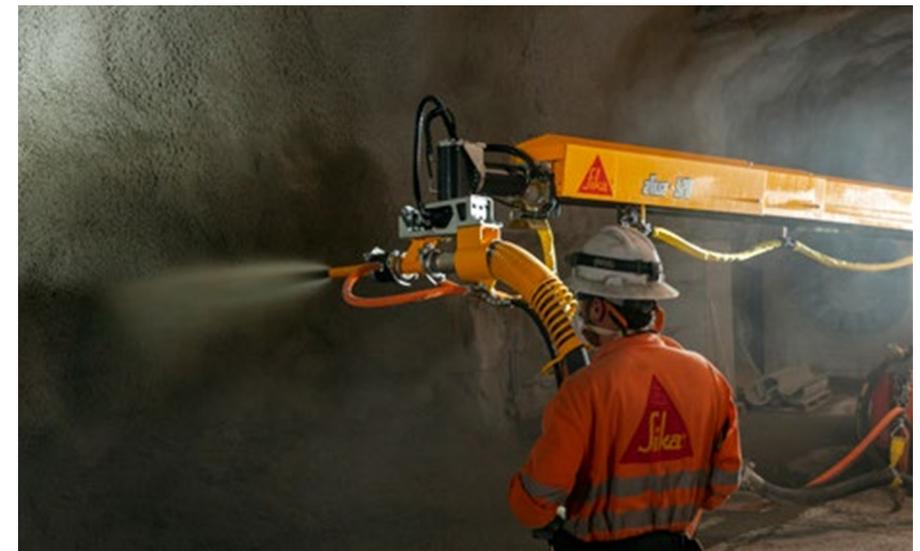


Fig 1.2: Concreto projetado por processo de fluxo denso

Tabela 1.1: Principais questões do concreto projetado

| | |
|----------------------|--|
| Processo de projeção | <ul style="list-style-type: none"> ■ Concretagem sem formas ■ Aplicação em locais de difícil acesso ■ Dimensões e forma variável do concreto projetado |
| Requisitos gerais | <ul style="list-style-type: none"> ■ Deve ser constantemente transportável (bombeamento/projeção) ■ Boa mistura no bico para evitar lentes (layering) ■ Boa auto-compactação pelo jato de projeção ■ Boa adesão ao substrato ■ Baixa geração de reflexão ■ Baixo desenvolvimento de poeira ■ Desenvolvimento de altas resistências iniciais |
| Requisitos especiais | <ul style="list-style-type: none"> ■ Trabalhabilidade ajustada (tempo em aberto prolongado) ■ Maior capacidade de carga ■ Alta durabilidade (resistência mecânica, resistência química, resistência ao fogo) ■ Alta densidade/baixa permeabilidade (reduced tunnel drainage maintenance) ■ Resistências finais adequadas ■ Textura de camada adequada para membranas (superfície lisa) ■ Sustentabilidade |

Não foi somente a tecnologia de projeção que mudou nos últimos anos. Esforços também foram feitos para melhorar a segurança das pessoas e do meio ambiente. Por exemplo, os aceleradores de pega altamente alcalinos para concreto projetado foram amplamente substituídos por aceleradores modernos livres de álcalis. Estes últimos são muito menos perigosos em contato com o tecido da pele humana e, adicionalmente, devido ao seu menor teor de álcalis, a durabilidade do concreto projetado é significativamente maior. Como volumes muito maiores de concreto projetado são aplicados quando comparados a antes, braços mecanizados de projeção têm sido utilizados. Isso permite que o operador de projeção trabalhe a poucos metros do bico de projeção e em uma área de trabalho muito mais segura do que a zona de escavação imediata do túnel. Assim, a projeção mecanizada melhorou muito a segurança do trabalhador.

O desenvolvimento de aditivos e adições para concreto projetado também desempenha um papel fundamental. Como já mencionado, novos aceleradores para concreto projetado melhoraram a saúde e a segurança ocupacional. Ao mesmo tempo, esses desenvolvimentos significaram que menos produtos químicos são necessários para os mesmos efeitos. Essa redução nos aceleradores para concreto projetado também aumentou significativamente a durabilidade e as resistências às compressões finais do concreto projetado. Além disso, os redutores de água de última geração não só reduzem a demanda de água e melhoram a trabalhabilidade, mas também propiciam o atingimento do desempenho ótimo do concreto projetado quando combinados e compatibilizados de maneira adequada com o acelerador de pega para concreto projetado e os ligantes. Além disso, os novos superplastificantes da gama SC, desenvolvidos especificamente para concreto projetado, reduzem as pressões de bombeamento no equipamento e devido à melhor fluidez e ar incorporado adicional, melhora assim a mistura do acelerador ao concreto no bico de projeção.

As fibras sintéticas estão sendo cada vez mais utilizadas ao invés de fibras de aço para melhorar a capacidade absorção de energia e ductilidade do concreto projetado. Duas vantagens fundamentais das fibras sintéticas são que elas não corroem e não há risco de lesões se as fibras se ricochetearem do concreto projetado. Por essa razão, um concreto projetado modificado com fibras sintéticas pode ser usado diretamente como uma camada de suporte para membranas de impermeabilização sem a necessidade de aplicação de uma camada adicional de concreto projetado simples (sem uso de fibras), como é o caso com fibras de aço. Uma possível desvantagem é sua menor resistência à fluência, no entanto, tal questão desempenha um papel secundário na construção do túnel, uma vez que a estabilização da escavação com concreto projetado é muitas vezes temporária e é coberta com anel interno de concreto estrutural no curso do projeto.

Em contraste ao concreto convencional, as altas exigências no desenvolvimento de resistência, a maior superfície específica dos agregados e a necessidade de adesão imediata ao substrato requerem um maior teor de ligantes. Por razões econômicas, aumento das exigências em termos de durabilidade e sustentabilidade, o consumo de cimento tem sido constantemente reduzido nos últimos anos e parcialmente substituído por adições tais como a cinza volante. Considerando que na década de 1990 cerca de 450 Kg de cimento Portland comum eram tipicamente utilizados para cada metro cúbico de concreto, o conteúdo de clínquer de apenas 300-400 kg/m³ nos ligantes atuais para concreto projetado tem sido comum.

Em suma, do ponto de vista atual, o concreto projetado é um método de construção flexível, econômico e de rápido, mas requer um alto nível de mecanização e operadores de projeção altamente capacitados.



Fig 1.3: Aplicação de concreto projetado, alto grau de mecanização

2 USOS DO CONCRETO PROJETADO

Alta flexibilidade, bom custo-benefício e boas propriedades físicas abrem uma ampla gama de aplicações para o concreto projetado. No entanto, de longe, o maior volume é usado hoje em túneis e mineração, onde a vantagem da projeção em áreas elevadas levou a novos métodos para assegurar as zonas de escavação.

Tabela 2.1: Usos do concreto projetado

| Área de aplicação | Exemplos |
|-------------------|---|
| Estabilização | Estabilização de escavações em túneis e mineração Estabilização de valas e taludes |
| Revestimento | Revestimento em concreto projetado - de geometrias complexas no alargamento do túnel - em túneis curtos e de rocha dura - em lugares de difícil acesso |
| Selamento | Selamento temporário por projeção da escavação em túneis Selamento permanente de túneis antigos Camada de selamento portante para membranas |
| Reabilitação | Reparo do concreto de pontes, cais e píeres danificados existentes Reparo da alvenaria de túneis e paredes de contenção danificados existentes |
| Construção | Casas de terra construídas com concreto projetado Piscinas e pistas de skate |
| Trabalho criativo | Paisagens de rochas artificiais para zoológicos Esculturas feitas de concreto projetado |

2.1 ESTABILIZAÇÃO DE ESCAVAÇÕES

Os principais campos de aplicação do concreto projetado são em túneis e mineração. A maior parte é usada para fornecer suporte temporário a escavações recentes, a fim de manter a estabilidade da escavação e controlar as deformações da rocha. A grande vantagem do concreto projetado é que ele rapidamente forma uma densa ligação com a superfície rochosa, o que limita o assentamento e movimentações adicionais, podendo também ser usado em combinação com outras técnicas de estabilização, como tirantes/ancoragens para rocha, telas de aço ou arcos (cambotas de treliças de barras ou perfis metálicos). Assim, o concreto projetado tornou-se elemento fundamental para os métodos de construção convencionais, tal como o New Austrian Tunneling Method (NATM).

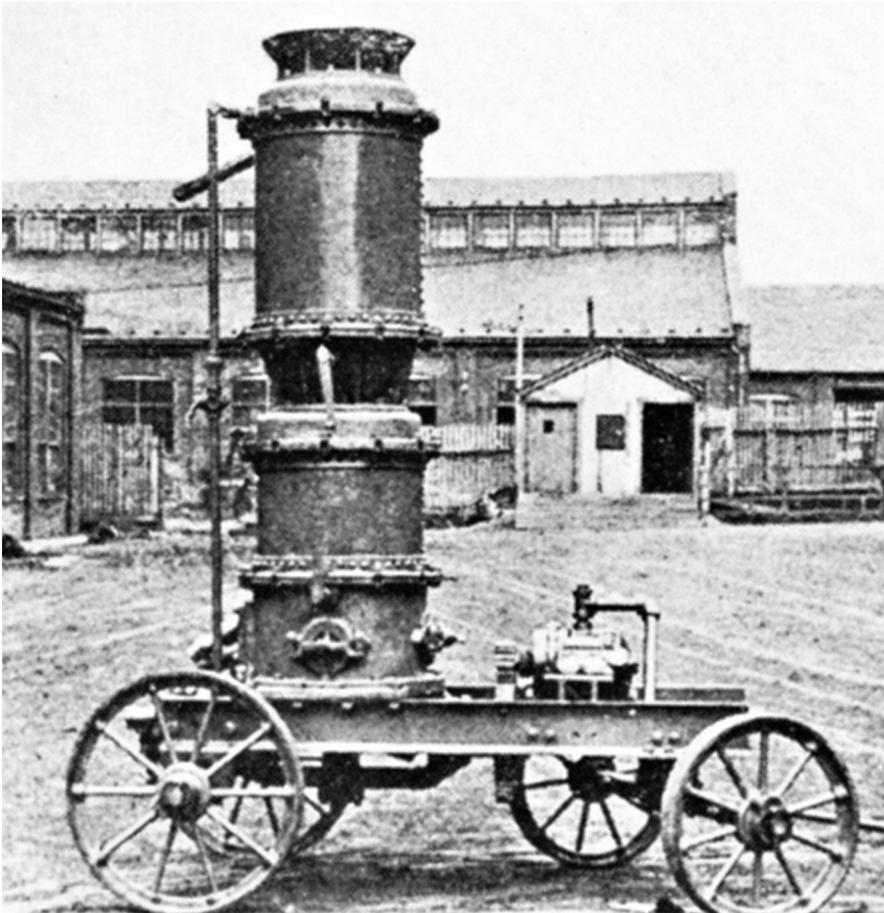


Fig 1.4: Primeiro modelo de equipamento de projeção, 1910

Foto: J. J. Shideler, Portland Cement Association, USA.
In Pietro Teichert, Die Geschichte des Spritzbetons. Schweizer Ingenieur und Architekt, 47,1979.

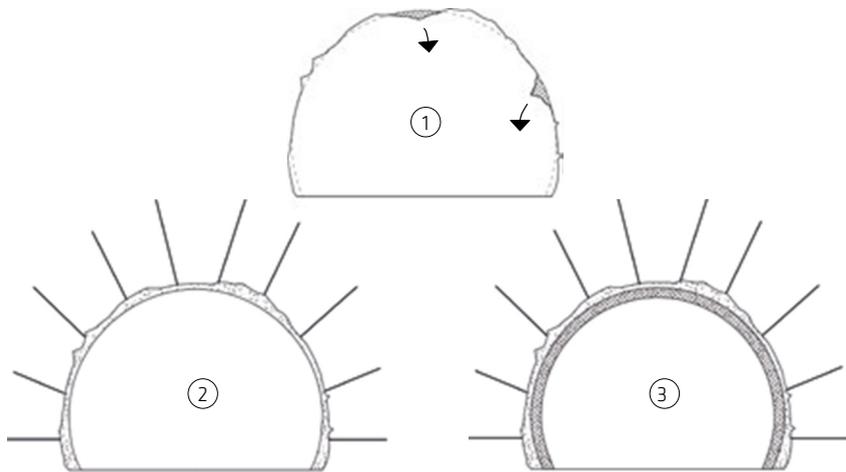


Fig 2.1: Principais etapas construtivas do túnel: Escavação e perfil (1), estabilização com concreto projetado e tirantes (2), revestimento com concreto (3)

A estabilização baseia-se no princípio da penetração em vazios superficiais existentes e cavidades. Concreto projetado, respectivamente seus componentes finos, penetram em quaisquer vazios ou cavidades em rochas soltas, bem como em gretas, fissuras e fraturas (falhas e juntas) de rocha sólida. Desta forma, a fricção entre camadas de rocha fraturada é mantida pela prevenção da lavagem dos finos da rocha (selamento) e pela introdução de material adicional (pasta). A estrutura da rocha na área de escavação melhora significativamente e resiste a pressões de afrouxamento adicionais. Ainda, mesmo uma fina camada de concreto projetado protege rochas sensíveis à umidade do desgaste provocado pela ventilação do túnel.



Fig. 2.2: Estabilização de escavação com concreto projetado

A formação de uma casca de concreto projetado estrutural pode criar uma abóboda de suporte de carga ou painéis de suporte em combinação com ancoragens, que podem então ser combinados com outros elementos de revestimento, se necessário. À medida que a estabilidade da rocha diminui, aumenta-se o esforço necessário para assegurar a escavação. Por exemplo, se a rocha é estável, a estabilização da escavação geralmente não é necessária, de modo que o concreto projetado é usado apenas como proteção da cabeça contra a queda de choccos (fragmentos de rocha). Por outro lado, a combinação necessária de reforço de rocha, por exemplo, concreto projetado, tirantes e cambotas são usados mais extensivamente, quanto mais fracas são as condições da rocha. Em muitos casos, hoje em dia, as fibras são adicionadas para melhorar a capacidade de carga do revestimento de concreto projetado, embora deva-se notar que as fibras sintéticas ou de aço não podem alcançar a capacidade de carga de armações em aço sob taxas mais elevadas.

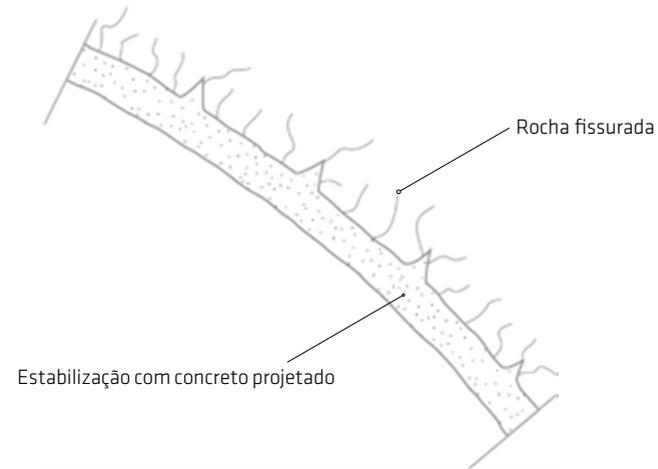


Fig 2.3: Estabilização pelo preenchimento de fissuras do substrato e pela construção de arco de concreto projetado e a rocha circundante

Quando usado em combinação com outros elementos estabilizadores, o revestimento de concreto projetado é frequentemente aplicado em duas etapas. Primeiro, uma fina camada de 3-5 cm de concreto projetado é aplicada na superfície da rocha recém-escavada. Esta camada serve como uma proteção para a cabeça evitando a queda de fragmentos de rocha (choccos) bem como para reforçar a rocha. Tirantes e, eventualmente, telas de aço são então instaladas e uma camada adicional de 10-20 cm de concreto projetado é aplicada para completar a estabilização da escavação.

O revestimento estrutural de um túnel pode ser executado criando uma ou duas camadas. Como o método de revestimento double-shell (dupla camada), a camada exterior (estabilização da escavação) só é considerada como uma proteção temporária. No entanto, a camada de estabilização da escavação pode ter que assegurar a cavidade por muitos anos até que a camada interior de concreto (revestimento interno do túnel) seja executada. Com este método de revestimento em dupla camada, a camada externa é somente considerada parcialmente ou nem é mesmo considerada como parte do projeto estrutural para o conceito geral de revestimento de túnel. Isto significa que o anel interno tem que ser projetado e construído para garantir a estabilidade a longo prazo da estrutura do túnel.

No entanto, há esforços para que ambas as camadas sejam utilizadas no cálculo estático do revestimento do túnel. Este conceito é chamado de construção single-shell (camada única). Isto permite integrar ao menos parte da camada externa no revestimento final permitindo que a espessura da parede do revestimento do túnel seja reduzida consideravelmente. A camada de estabilização da escavação é pré-carregada pela relaxação da rocha e pressão de água subterrânea, o que leva a certa redução dos requisitos para a camada interna em relação à capacidade de carga e estanqueidade. Quando o concreto projetado é carregado durante um período curto de tempo em idade precoce, a resistência à compressão final é reduzida comparada a um concreto projetado não carregado. Por essa razão e devido à menor qualidade das primeiras camadas de concreto projetado (devido à condição de aplicação e danos resultantes do processo de escavação), uma camada externa não pode ser totalmente incluída no conceito geral da proteção do revestimento.

2.2 REVESTIMENTO

A abordagem mais comum para o revestimento secundário em túneis double-shell é usar concreto in-situ, moldado no local com formas de grandes seções que são movidas ao longo de trilhos para repetição de lançamento e moldagem, geralmente com seções de 8 m a 12,5 m de comprimento.

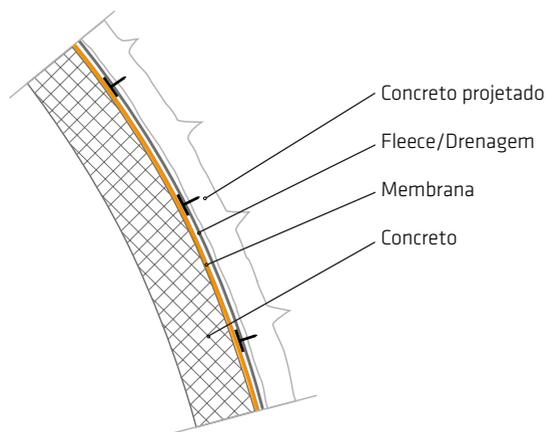


Fig 2.4: Revestimento de túnel Double-shell

Esta abordagem fornece uma solução rápida e econômica para as seções transversais regulares de túneis mais longos. No entanto, existem algumas limitações técnicas e comerciais importantes:

- Em túneis mais curtos, as custosas formas podem não ser econômicas.
- Para mudança de geometrias, ampliação de seções, passagens cruzadas etc. este tipo de forma não é adequado e ou tem que ser modificado para cada moldagem, ou substituído.

Nessas situações, um revestimento secundário feito de concreto projetado em vez de concreto in-situ pode ser um sistema mais adequado, com operações menos complexas e também a possibilidade de economizar tempo e dinheiro, pois o concreto projetado não requer forma alguma. O método de concreto projetado é uma substituição adequada para os requisitos mais comuns de revestimento interno de concreto e, portanto, pode fornecer uma solução para ser aplicada em túneis mais curtos, ou onde exista mudanças de seção transversal, por exemplo, em alargamentos, junções, aberturas e passagens cruzadas etc.

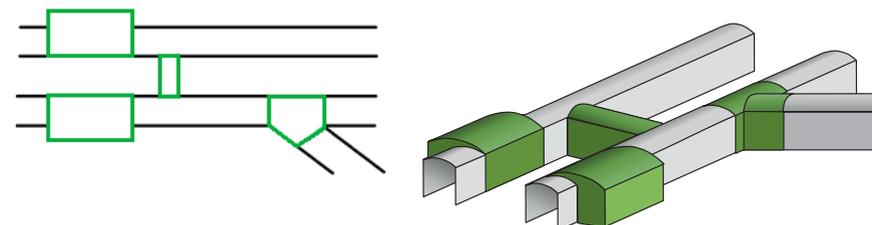


Fig 2.5: Cenários de seções de túnel para revestimento em concreto projetado livre de formas

O concreto projetado para revestimento secundário é aplicado dentro da camada impermeável em cima da membrana com a ajuda de uma lâmina de proteção especial e uma tela para redução de reflexão. A principal desvantagem é que quase não há adesão entre a membrana lisa de impermeabilização em PVC ou TPO e a camada de concreto projetado recém aplicada. Há, portanto, a necessidade de tomar algumas medidas especiais.



Fig 2.6: Instalação de um teto de túnel com forma variável por meio de concreto projetado na membrana com a ajuda de tela metálica (paredes foram construídas com formas e concreto in-situ)

Para estabilizar o concreto projetado, quase sem adesão ao substrato, inicialmente na área de aplicação, malhas de aço são instaladas como sistema redutor de reflexão próximo à membrana com a ajuda de ancoragens. O espaço livre entre a malha de aço e a membrana de impermeabilização é projetado para ser cerca de três vezes o diâmetro máximo característico do agregado (ou seja, para 8 mm, temos de 24 a 30 mm). O concreto projetado é então aplicado em um padrão tipo grelha, com os pontos de ancoragem da malha projetados e, em seguida, estes são unidos, formando uma grelha (Figura 2.6). Este procedimento evita que a malha de reflexão oscile e o concreto projetado recém aplicado se desprenda. Finalmente, os compartimentos formados com as grelhas são preenchidos para criar uma camada superficial completa de concreto projetado. Para as armações se unem espaçadores ligados aos pontos de ancoragem. O concreto projetado é aplicado para cobrir esta malha da mesma forma que para a camada inicial. Após a segunda tela, finalmente, o revestimento interno é coberto com concreto projetado e a superfície é concluída conforme necessário.

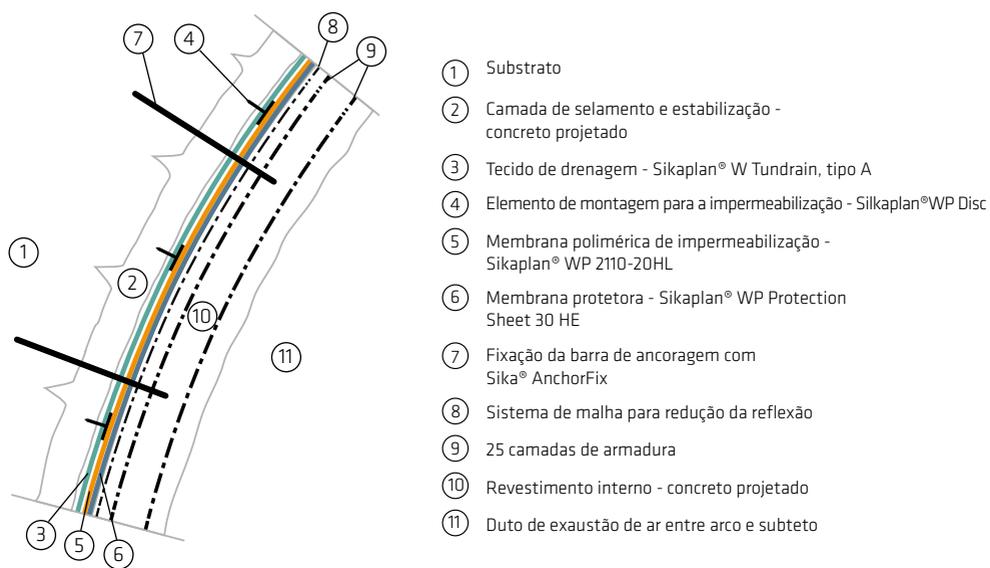


Fig 2.7: Revestimento de túnel em double-shell com concreto projetado

Além do uso de membranas, o próprio revestimento de concreto projetado também pode ser impermeável até certo ponto. Concreto projetado, como qualquer tipo de concreto, nunca é completamente impermeável por si só. A impermeabilização da zona de escavação e da estrutura de revestimento do túnel pode ser alcançada até certo ponto por diferentes abordagens e a combinação de conceitos e medidas distintas:

- Pré-selamento (evitando que a água chegue até a camada de revestimento)
 Dependendo da quantidade e pressão do ingresso de água, ela pode ser interrompida ou drenada com a ajuda de medidas de selamento previamente instaladas. A interrupção da entrada de água pode ser alcançada usando injeções (cimentícias ou de resina) para criar uma barreira para a água, ou por um sistema de drenagem que é instalado para drenar a água usando tecidos drenantes ou tubos (por exemplo, sistema Sika® FlexoDrain).

- Escolha de materiais
 A dosagem deve ser realizada especificamente para produção de um concreto projetado impermeável, que deve ser confirmado antes do uso tanto em laboratório quanto em testes de campo com os materiais reais. Todas as medidas devem ser tomadas para garantir que o concreto projetado seja compacto e livre de fissuras. Um fator fundamental para a impermeabilidade do concreto projetado é a redução da água da mistura. Qualquer água, que é adicionada acima da quantidade necessária para hidratação completa, resulta em porosidade do concreto projetado final e, portanto, permeabilidade à água. O uso de superplastificantes é indispensável por essa razão - assim como uma redução razoável da água é um pré-requisito para alcançar o desenvolvimento de alta resistência inicial e durabilidade a longo prazo do concreto projetado.

Para alcançar a compactidade ótima do concreto projetado, a dosagem inteira é motivo de preocupação, por exemplo, o tipo e o consumo de cimento, o uso de adições minerais (ex.: sílica ativa) e a escolha de um acelerador livre de álcalis.

Durante a fase inicial de um revestimento de concreto projetado recém aplicado, fissuras podem se formar na maturação do concreto projetado, que é outro aspecto importante no que diz respeito à estanqueidade. Novamente, a dosagem desempenha um papel importante e há também outras precauções que devem ser tomadas para proteger a superfície da secagem e reduzir a fissuração, por exemplo, usando micro fibras sintéticas.

- Aditivos que melhoram a auto selagem
 O uso de aditivos complementares que melhoram a auto selagem de fissuras do concreto pode ser benéfico. SikaControl®-WT (por exemplo, Sika® WT-200 P) é usado para apoiar e promover o processo de auto selagem e cicatrização das fissuras. No entanto, esse tipo de aditivo também pode influenciar o desenvolvimento das resistências iniciais do concreto projetado e, conseqüentemente, deve ser testado.

- Aplicação do concreto projetado
 Uma vantagem específica da aplicação do concreto projetado é o processo de pulverização. Quando o revestimento de concreto projetado é aplicado, isso é feito em várias camadas mais finas. Quaisquer fissuras precoces que ocorram durante a fase inicial de cura, por exemplo, duas camadas de concreto projetado são normalmente aplicadas em intervalos de poucos turnos de trabalho, estas são então seladas com pasta de cimento da camada de concreto projetado subsequente. Isso minimiza as fissuras e, acima de tudo, evita fissuras transpassantes por todo o revestimento de concreto projetado.

Em particular, ao aplicar concreto projetado através de uma malha de aço, deve-se garantir que não sejam criadas sombras de spray atrás das telas. Isso requer um operador especialmente treinado e qualificado, bem como propriedades adequadas no estado fresco, por exemplo, uma mistura muito fluida.

Da mesma forma que o concreto projetado não é apenas um produto resultante de suas matérias-primas, mas o resultado da combinação de materiais, equipamentos e aplicação, também sua estanqueidade - como parte de sua qualidade - depende dessa mesma combinação das qualidades de cada parte individual como um sistema holístico.

3 REQUISITOS DO CONCRETO PROJETADO

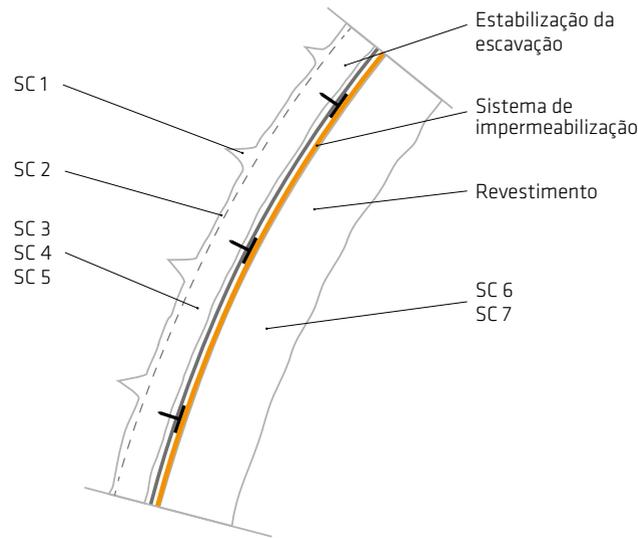


Fig 2.8: Propósito da aplicação de concreto projetado e sua classificação de acordo com a SIA 138 (Suíça)

Tabela 2.2: Especificação de qualidade do concreto projetado na construção de revestimentos de túneis de acordo com a SIA198 (Suíça)

| Classe do Concreto Projetado | Classe de Resistência à Compressão | Classe de Exposição | Áreas Recomendadas de Aplicação |
|------------------------------|------------------------------------|---------------------|---|
| SC 1 | C16/20 | X0 | Preenchimento de fissuras e cavidades |
| SC 2 | C25/30 | X0 | Suporte imediato |
| SC 3 | C25/30 | XA1, XD1 | Camadas adicionais do suporte temporário; respectivamente, primeira camada, se não houver requisitos especiais em relação ao suporte imediato |
| SC 4 | C30/37 | XA1, XD1 | Suporte temporário para revestimento single-shell, armado |
| SC 5 | C30/37 | XA2, XD1 | |
| SC 6 | C30/37 | XA1, XD1, XC3, XF3 | Revestimento para single-shell, armado ou não armado |
| SC 7 | C35/45 | XA1, XD3, XC3, XF3 | |

Dependendo do seu uso, por exemplo, como talude ou como estabilização de escavação, e das demandas de engenharia da estrutura como revestimento temporário ou permanente, os requisitos para o concreto projetado diferem bastante. Assim, cada situação de projeto individual precisa de uma definição individual de todos os parâmetros relevantes que afetarão as propriedades e requisitos do concreto projetado através de todas as diferentes etapas e estados, desde o fresco até, finalmente, o endurecido. É essencial saber as necessidades exatas do local, pois caso contrário é obviamente impossível definir os materiais corretos, dosagem ou tipo e método de lançamento do concreto projetado.

Além dos parâmetros técnicos que se detalham abaixo, há outros pré-requisitos e requisitos gerais, que os projetistas também devem considerar ao analisar o processo de concreto projetado como um todo. Esses parâmetros adicionais incluem as regulamentações locais relevantes de Segurança, Saúde e Meio Ambiente (SSMA), para a aplicação altamente específica do concreto projetado, especificamente em relação aos materiais e ao processo.

3.1 SUSTENTABILIDADE

Sustentabilidade é um termo abrangente que, de fato, se refere principalmente aos materiais. Em conexão com o concreto projetado e seus campos específicos de aplicação, no entanto, é essencial considerar todo o ciclo de vida dos componentes do concreto projetado: desde as matérias-primas, passando pelo concreto fresco e seu processamento, até a construção finalizada e seu esforço de manutenção ao longo de toda a vida útil. Conseqüentemente, a sustentabilidade em relação ao concreto projetado torna-se uma questão mais holística e está intimamente relacionada a muitos requisitos técnicos, conforme descrito nas seções a seguir em relação a todo o ciclo de vida do concreto projetado.

A tecnologia do concreto projetado em si, é um método para lançar concreto de forma muito eficiente, ou seja, rapidamente, com pouco esforço e de forma muito seletiva. Isso, também, é uma contribuição para a sustentabilidade, especialmente devido ao fato de que o concreto projetado usado na construção subterrânea garante a estabilização mais rápida e melhor possível de zonas de escavação subterrânea com entrada mínima de material. As perdas devido ao material de reflexão na projeção são mínimas com o uso de aceleradores livres de álcalis.

As tendências recentes do concreto projetado consideram a sustentabilidade em relação à pegada de CO₂ pelo uso de cimentos compostos ou sistemas de ligantes compostos. Além disso, o uso de agregados britados em vez de areia natural e cascalho reduz o consumo de recursos naturais limitados.

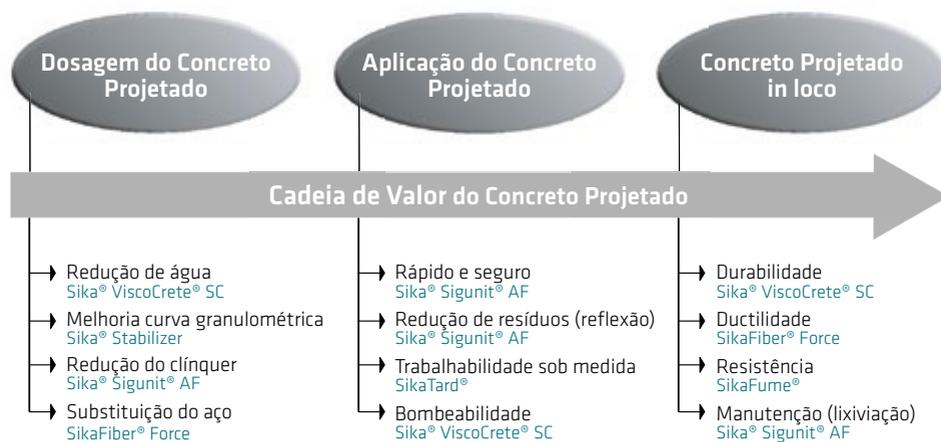


Fig 3.1: Impacto dos produtos para concreto projetado na sustentabilidade

Aditivos modernos fazem uma contribuição importante para garantir que as propriedades relativas ao processo e à qualidade do concreto projetado também possam ser alcançadas em alto nível com essas matérias-primas. O superplastificante Sika® ViscoCrete®, entre outros, efetua misturas de concreto projetado de fácil bombeamento de alta qualidade, economizando energia e recursos.

Finalmente, ao longo do ciclo de vida das estruturas subterrâneas de concreto projetado, os esforços de manutenção e custos desempenham um papel importante para o aspecto de sustentabilidade do concreto projetado. Concreto projetado está sendo cada vez mais utilizado como revestimento permanente ao invés de temporário. Novamente os aditivos contribuem significativamente para essa tendência ao permitir um concreto projetado altamente durável, independentemente da mudança das matérias-primas: com a ajuda de superplastificantes Sika® ViscoCrete® para uma redução máxima de água e os aceleradores livres de álcalis Sika® Sigunit® AF para altas resistências à compressão finais, concreto projetado altamente durável com baixa porosidade, lixiviação mínima e resistência química à água subterrânea podem ser alcançados.

Por último, mas não menos importante, a segurança e a saúde dos trabalhadores devem ser consideradas como parte integral da avaliação da sustentabilidade. A tendência da tecnologia recente de aceleradores livres de álcalis em concreto projetado melhorou substancialmente a segurança no trabalho devido a um material mais compatível com a saúde para lidar com menor emissão de poeira durante a projeção e um desenvolvimento uniforme e contínuo de resistência à compressão em concreto recém projetado, o que é evidente para a segurança no local de trabalho.

3.2 DOSAGEM DO CONCRETO PROJETADO

Em um primeiro momento, os requisitos para a dosagem do concreto projetado baseiam-se no método de aplicação do concreto projetado, ou seja, método de fluxo denso ou aerado. Nesse sentido, os requisitos para uma mistura de concreto projetado via úmida, em particular, devem ser observados de perto e são descritos em mais detalhes abaixo.

No entanto, a estreita interdependência de materiais e processo de aplicação pode também ser visto aqui e os requisitos com relação ao processo também tem um efeito direto sobre a qualidade do concreto projetado final.

A dosagem para concreto projetado via úmida tem que atender:

- **Tempo de trabalhabilidade:** Além da distância entre a usina de concreto e o local de aplicação, existem muitas outras razões para possíveis atrasos ao longo de todo fluxo de trabalho, por exemplo, tempos de espera, lacunas na execução de outras frentes de trabalho, quebra de equipamentos e mudanças de turno. Um cenário ótimo para o transporte de concreto projetado é que seja entregue o mais cedo possível após a escavação e limpeza e deve manter-se trabalhável por ao menos duas ou três horas.
- **Bombeabilidade:** A bombeabilidade do concreto projetado é baseada na combinação bem equilibrada de três características:
 - *Viscosidade = fluidez*

De fato, a mistura precisa ser líquida suficientemente para fluir através da bomba de pistão e tubulações do sistema. Uma viscosidade muito alta é, portanto, obviamente um critério de exclusão essencial para a bombeabilidade do concreto projetado. Por outro lado, enquanto a baixa viscosidade permite a fluidez geral da mistura, não é uma garantia de bombeabilidade, ou seja, no fluxo sob condições específicas que surgem, tais como em altas pressões e tubulações estreitas e sinuosas. Os dois parâmetros seguintes devem, portanto, ser necessariamente cumpridos.



- *Lubrificação = redução de atrito entre agregados (interno) e na interface com as linhas de bombeamento*

A principal parcela de volume de concreto projetado são os agregados. Enquanto fluem (sob pressão), eles devem se mover em torno um do outro permanentemente e com o menor consumo de energia possível, o que é contrário à sua natureza. É a pasta da mistura de concreto projetado que cria esta propriedade de lubrificar a superfície dos agregados e permitir que eles deslizem uns sobre os outros (ver também a Seção 5.1.1.2). Além disso, a pasta também resulta em uma lubrificação externa minimizando o atrito entre a mistura e a superfície das tubulações.

- *Coesão* = manter uma mistura homogênea, sem separação e sem exsudação. Ambos os parâmetros acima mencionados, uma fluidez razoável da mistura (viscosidade) e a lubrificação dos agregados, dependem fortemente da homogeneidade duradoura da mistura. A pasta não deve separar-se dos agregados nas condições dadas, bem como a pasta em si não deve separar-se (exsudação).

- **Projeção:** Além da bombeabilidade, a mistura fresca de concreto projetado também deve ser capaz de passar suavemente através do mangote, se dispersar bem e facilmente para misturar homogeneamente com o acelerador antes do concreto finalmente ser projetado e compactado sobre o substrato. A capacidade de projeção, caracterizada pela fluidez e baixa pegajosidade, é um importante pré-requisito para a qualidade ótima do concreto projetado aplicado.

3.3 APLICAÇÃO E CONCRETO PROJETADO NO ESTADO FRESCO

O principal objetivo do concreto projetado recém aplicado é proteger rapidamente escavações subterrâneas. A tecnologia de concreto projetado fornece um excelente material para este fim, que desenvolve resistências iniciais rapidamente e, graças aos braços dos robôs de projeção, tal método de aplicação pode ser executado pelo operador de forma segura.

- **Baixa poeira e reflexão:** A formação de poeira durante as aplicações de concreto projetado é um dos graves problemas de saúde com os trabalhos com concreto projetado. A poeira do spray consiste nas partes mais finas da mistura (especialmente cimento) assim como o acelerador liberado com o ar secundário. É fortemente alcalina/cáustica e, portanto, prejudicial aos olhos e trato respiratório (irritação da pele, silicose,...). Reflexão afeta negativamente a eficiência de custo e tempo de todo o processo de projeção devido à perda de material, transporte adicional de materiais, além do descarte adicional do resíduo de materiais. Além disso, há implicações para uma qualidade reduzida do concreto projetado: uma vez que a maior parte do material de reflexão será sempre de grãos de tamanhos maiores, a composição do concreto projetado é substancialmente alterada do seu conceito de dosagem e potencialmente do seu desempenho pretendido. Várias medidas podem ser tomadas para reduzir a poeira e os problemas de reflexão:

- *Otimização de dosagem*

Uma adequada graduação dos agregados é necessária por muitas razões, porém, grãos de tamanho excessivo geram forte reflexão, assim, concreto projetado geralmente é limitado a misturas de 0-8 mm. Com seu teor de finos, os agregados contribuem também para a poeira geral. O volume de pasta (ligantes, finos, água) além da quantidade necessária para lubrificação é desnecessário por gerar mais poeira.

- *Redução do fluxo de projeção (m³/h)*

A taxa de projeção não deve ser usada até o limite da capacidade do equipamento. Isso normalmente resulta em altas perdas por reflexão, deslocamentos e baixa qualidade do concreto projetado (e definitivamente não a uma velocidade máxima de aplicação). Além disso, o alto fluxo de projeção aumenta drasticamente a formação de poeira.

- *Redução do ar comprimido*

Se o ar comprimido não é bem balanceado com a saída de concreto projetado, excesso de poeira é gerado.



- *Redução da dosagem de acelerador*

Se a dosagem do acelerador for muito alta, o concreto projetado enrijece muito rápido. Devido ao atrito no mangote, bem como devido à baixa adesão ao substrato, mais poeira é gerada e a reflexão aumenta.

- *Uso de acelerador AF ao invés de alcalino*

Aceleradores livres de álcalis em vez de produtos alcalinos reduzem as propriedades cáusticas da poeira. Isso está especialmente relacionado à fração de poeira originária da corrente lateral de ar. Além disso, o endurecimento inicial é um pouco mais moderado com os aceleradores AF resultando em uma melhor adesão do material projetado e, portanto, menos reflexão.

- **Aderência ao substrato:** Um aspecto essencial do concreto projetado é sua forte adesão ao substrato. Isso é importante para tornar em primeiro lugar as aplicações verticais e aéreas possíveis. Além disso, esta forte ligação do concreto projetado ao substrato conduz a elevada capacidade de carga do revestimento de concreto projetado em combinação com o substrato. Quando a projeção se inicia sobre um substrato em rocha ou em uma camada de concreto previamente projetada, a reflexão normalmente indesejada suporta a formação de uma camada de adesão muito forte. Devido à alta energia cinética do material projetado e sua projeção em um substrato rígido e não flexível, todo agregado graúdo na primeira passada é perdido por reflexão. Uma fina camada de argamassa remanescente de areia e ligante se forma na interface, que também é forçada sob pressão para dentro das menores fissuras e vazios da superfície do substrato, criando uma excelente camada de ligação enriquecida com cimento.

■ **Compactação:** Nos primeiros minutos após a aplicação do concreto projetado, a resistência de aderência e compactação do concreto projetado são decisivos. A alimentação precisa de quantidade razoável de ar comprimido, bem como uma distância ideal do bico de projeção ao substrato são parâmetros-chaves neste momento. A consequência de ar insuficiente é uma compactação muito baixa do concreto, que por sua vez influencia negativamente a resistência à compressão final. Em excesso produz poeira excessiva e aumento das perdas por reflexão. Partículas finas de cimento e acelerador perdidas como poeira, são além disso componentes potencialmente importantes que fazem falta para o adequado desenvolvimento de resistências. Assim, uma distância incorreta do bico de projeção, muito longe ou muito perto do substrato, leva a efeitos similares.

■ **Resistência muito inicial** (enrijecimento/pega), até aprox. 2 horas desde a projeção: Considerando que a mistura de concreto projetado deve ser fluida e bombeável, sua consistência deve tornar-se rígida logo após ser projetada. De acordo com os requisitos individuais do local (inclinação, escavação...) o desenvolvimento de resistência inicial é definido conforme três diferentes classes J de acordo com a EN 14487-1. Em um concreto projetado J2, normalmente aplicado em aplicações aéreas, se deve alcançar até 1,0 - 1,5 MPa dentro da primeira e segunda hora.

■ **Resistência inicial**, 2 a 24 horas desde a projeção: Após o período inicial de endurecimento (0 - 2 h) a resistência à compressão do concreto projetado recém aplicado aumenta continuamente. A resistência inicial é, basicamente, alcançada pela reação de hidratação do cimento. A mistura compreende aditivos para a melhoria de várias propriedades (por exemplo, trabalhabilidade, bombeabilidade, capacidade de projeção, durabilidade), os efeitos retardantes e fluidificantes os quais são inativados pela adição do acelerador no bico de projeção. Em relação à segurança no local, este período de 2 a 24 horas é extremamente importante. Com um aumento da resistência à compressão na faixa J2 durante este período de tempo, pode-se considerar que a hidratação do cimento foi suficientemente iniciada, posteriormente à aceleração inicial, que é crucial para evitar o deslocamento do concreto projetado.

3.4 CONCRETO PROJETADO NO ESTADO ENDURECIDO

Dependendo se o concreto projetado é usado como camada de revestimento temporário ou permanente, os requisitos obviamente variam, particularmente no que diz respeito à sua durabilidade. No entanto, qualquer revestimento de concreto projetado deve proteger a zona de escavação por um período definido e fornecer as propriedades estáticas correspondentes, seja por meses, anos ou permanentemente.

■ **Resistência à compressão final**

A resistência à compressão final do concreto projetado é determinada principalmente pelo tipo de cimento e a dosagem geral do concreto, por exemplo, granulometria, relação água/cimento (relação a/c), tipo de acelerador. Em construção subterrânea, as demandas usuais em relação à resistência à compressão não têm prioridade para o concreto projetado, uma vez que este é usado frequentemente apenas para estabilização temporária da escavação. De todos os aditivos diferentes que podem ser utilizados, o superplastificante (relação a/c) e o tipo de acelerador têm o maior impacto na resistência à compressão final.

■ **Absorção de energia**

Dependendo da geologia e da mecânica da rocha, o concreto projetado é geralmente muito frágil e requer reforço para um comportamento adequado de capacidade de carga. Este reforço pode ser alcançado classicamente com tela de aço e/ou barras de aço ou como um reforço inerente pela adição de fibras à mistura durante a produção da mistura.

■ **Durabilidade**

Existem muitos parâmetros, desde os materiais até a habilidade do operador de projeção que têm um impacto substancial na durabilidade do concreto projetado, por exemplo, relação a/c, tipo de cimento e quantidade de adições, curva granulométrica, além da qualidade de aplicação. Durabilidade também é um termo coletivo que envolve várias propriedades do concreto projetado:

- Impermeabilidade

Se o concreto projetado for muito permeável e/ou a pressão d'água subterrânea for demasiadamente alta, a água pode penetrar na estrutura do concreto projetado. Como resultado da migração da água para dentro e para fora do concreto projetado, dois tipos de degradação da matriz cimentícia tornam-se possíveis, seja por ataque químico de substâncias dissolvidas da água subterrânea circundante ou por lixiviação de componentes químicos da matriz do concreto projetado.

A este respeito, a densidade do concreto projetado é um fator-chave para um revestimento durável de concreto projetado. Medidas como a redução do consumo de cimento, substituição de clínquer ou o uso de adições (por exemplo, cinza volante, micro sílica) e a redução da relação a/c são essenciais.

- Resistência contra ataques químicos

Em particular, é o ataque de sulfatos que resulta em degradação química de hidratos de cimento, por exemplo, pela formação de etringita tardia, que causa uma força mecânica devido à pressão de cristalização, ou pela formação de taumasita resultando na decomposição da matriz cimentícia. O revestimento de concreto projetado deve resistir a este tipo de ataque, que está relacionado com a natureza química da água do entorno do túnel. Isto é alcançado por uma escolha adequada de materiais, por exemplo, usando cimentos resistentes a sulfatos (baixo teor de C_3A) e medidas de impermeabilização, como a redução da relação a/c e a adição de sílica ativa.



Fig 3.2: Danos devido a concreto projetado insuficientemente durável (ex.: pressão de cristalização devido ao ataque de sulfatos)

- Resistência contra lixiviação
Como consequência da migração de água através da matriz do concreto projetado, a pasta de cimento endurecido é exposta a um processo constante de dissolução. Em construções subterrâneas, a água de lixiviação é drenada dentro do túnel onde, em contato com o ar, os compostos lixiviados do cimento precipitam e entopem o sistema de drenagem, ao longo do tempo. Lixiviação do concreto projetado, portanto, causa uma redução da resistência do revestimento, bem como o custo constante para a manutenção funcional do sistema de drenagem. As medidas para prevenir a lixiviação de revestimentos de concreto projetado são essencialmente as mesmas que para a impermeabilização, melhorar a densidade do concreto projetado e reduzir a solubilidade do sistema de ligantes.
- Resistência ao gelo/degelo
Dentro dos túneis, a resistência ao gelo/degelo do concreto projetado não é um problema. No entanto, para a estabilização de taludes ou aplicações de concreto projetado na área de emboque do túnel, concreto projetado como qualquer outro concreto, deve ser capaz de suportar as condições adversas do inverno e medidas devem ser tomadas para este fim. É a pressão de cristalização da água congelada dentro da matriz de concreto projetado que é a causa dos danos. Assim, medidas adequadas para melhoria da resistência do concreto projetado exposto a baixas temperaturas são aumentar sua densidade/impermeabilidade, a fim de evitar a entrada de água na estrutura. Além disso, a introdução de pequenas bolhas de ar melhora a resistência ao gelo/degelo do concreto projetado, por criar espaço livre para a expansão da água em congelamento dentro da matriz cimentícia. Aditivos incorporadores de ar específicos estão disponíveis para este fim.
- Resistência ao fogo
Em concreto e concreto projetado expostos a incêndio, à medida que a temperatura sobe além de 100 °C, a água capilar líquida (água livre) e a água fisicamente ligada (em poros de gel e camadas intersticiais) mudam repentinamente para vapor e uma alta pressão se desenvolve dentro do concreto. Assim que essa pressão for maior do que a resistência à tração interna da matriz, o concreto fratura e sofre lascamento (*spalling*). Como resultado, o concreto projetado é continuamente danificado durante um incêndio e sua estrutura pode ser destruída. Micro fibras de polipropileno (PP) são usadas em concreto projetado para seu efeito *anti-spalling* em caso de incêndio. Com o calor crescente, as fibras derretem e os vazios que surgem permitem a liberação da pressão de vapor.

4 MATERIAIS PARA CONCRETO PROJETADO

Concreto projetado, como um tipo especial de concreto, é basicamente a combinação de três materiais, os quais em ordem de quantidades utilizadas são:

1. **Agregados** (areia e agregados graúdos) como principal matriz do concreto projetado
2. **Cimento** como ligante do sistema, quando combinado com
3. **Água** para plasticidade/bombeabilidade e para a hidratação do ligante

Para ampliar suas propriedades e potenciais aplicações, concreto pode facilmente vir a ser um sistema de muito mais componentes (com adições, aditivos, etc.), resultando em complexas interações químicas e mecânicas, especialmente quando combinado com os parâmetros de aplicação para concreto projetado:

4. **Adições** (microfibras, sílica ativa, filler calcário, cinza volante, escória)
5. **Aditivos** (superplastificantes, retardadores, incorporadores de ar e aceleradores de pega para concreto projetado)
6. **Reforço** (macrofibras sintéticas ou de aço)

Todos estes materiais base têm um impacto sobre uma ou outra propriedade do concreto, conforme requerido para o concreto projetado durante seus vários estados ao longo do processo inteiro de trabalho. Consequentemente, a arte do concreto projetado é baseada em encontrar o balanço correto de todos estes ingredientes de maneira a atender os requisitos dados - em combinação com etapas adequadas de aplicação desde a preparação e mistura até a aplicação.

4.1 AGREGADOS

Os agregados formam a estrutura da matriz do concreto projetado. Aproximadamente 75% em massa (64% em volume) do concreto projetado consiste em componentes agregados. As propriedades dos agregados (natureza, forma, graduação) têm uma enorme influência sobre a trabalhabilidade e as propriedades do concreto projetado no estado endurecido. Eles são obtidos naturalmente como partículas de forma arredondada de rios ou depósitos glaciais ou artificialmente a partir da extração e moagem em pedreiras ou trabalhos de escavação.

Agregados (miúdo e graúdo):

- representam a maior parte da mistura de concreto
- tem um substancial impacto sobre a trabalhabilidade e bombeabilidade
- influenciam as propriedades mecânicas (resistências à tração e compressão)
- influenciam a homogeneidade da mistura de concreto projetado
- tem um forte impacto sobre a demanda de água da dosagem base

Conseqüentemente, agregados devem ser cuidadosamente considerados na dosagem do concreto projetado com respeito a:

- Forma (arredondado ou britado):
Influencia a fluidez/bombeabilidade da mistura, sua demanda de pasta e as propriedades mecânicas do concreto projetado
- Curva granulométrica:
Afeta o bombeamento tão bem como as propriedades de resistência do concreto projetado
- Mineralogia e impurezas (ex.: minerais argilosos, mica):
Pode causar devido aos efeitos de adsorção uma elevada demanda de água e uma trabalhabilidade reduzida, uma menor eficácia dos aditivos, e baixas resistências finais à compressão.



Uma importante consideração na dosagem de concreto projetado comparada ao concreto estrutural é o diâmetro máximo do agregado que é tipicamente limitado a 8 mm em concreto projetado. A razão para esta restrição é devido à aplicação por projeção: no bico de projeção o material é acelerado a uma velocidade de aproximadamente 30 m/s. A energia cinética das partículas é proporcional ao seu raio a uma potência de três. Devido a sua maior energia cinética, a fração de partículas repelidas torna-se exponencialmente maior com o aumento do diâmetro, resultando em maior reflexão e custos desnecessários (materiais extras, tempo e esforço). O tamanho do grão do concreto projetado, limitado a 8 mm (em algumas regiões até 13 mm), é o consenso mais aceito de um preenchimento ótimo dos vazios na graduação do agregado com o mínimo volume de pasta e uma taxa mínima de reflexão (ver Capítulo 5.1.1, Dosagem de concreto projetado via úmida).

4.2 CIMENTO

De longe, o material de construção mais importante na atualidade é o concreto. Cimento, seu agente aglutinante, é produzido em todo o mundo com aproximadamente 4,1 bilhões de toneladas por ano (2019). Ele pertence à categoria dos ligantes hidráulicos, o que significa que há uma reação aglomerante induzida pela água, o que resulta em um produto final solidificado (pedra de cimento).

O termo “cimento” é oriundo do método construtivo Romano “opus caementi- tium” (= obras de pedra de escombros). Há mais de 2000 anos, eles construíram edificações impressionantes e extremamente duráveis não só pelo assentamento de tijolos, mas com a ajuda de uma mistura inicialmente plástica de destroços, água e uma mistura de pozolanas naturais com cal calcinada como aglomerante hidráulico. Nosso cimento Portland moderno, que é o ligante no concreto, recebeu seu nome a partir deste nome original do concreto Romano. Ele é baseado no clínquer que é produzido a partir de calcário, marga e argila, que é calcinado a 1450 °C em fornos rotativos. Durante este processo, água ligada quimicamente e CO₂ são liberadas a partir das matérias primas e os materiais remanescentes são sinterizados em novas fases minerais que formam os grânulos de clínquer.

Posteriormente, como ligante em concreto, o cimento entra em contato com a água de amassamento e absorve parte dela em uma complexa reação de hidratação, ao longo do tempo. Este processo de hidratação é realizado por processos de dissolução (das fases do clínquer) e precipitação (dos hidratos de cimento). Os hidratos recém cristalizados constroem um mineral sólido contínuo que cria a interconexão dos agregados. Desta forma, o concreto tem sua pega e endurece.

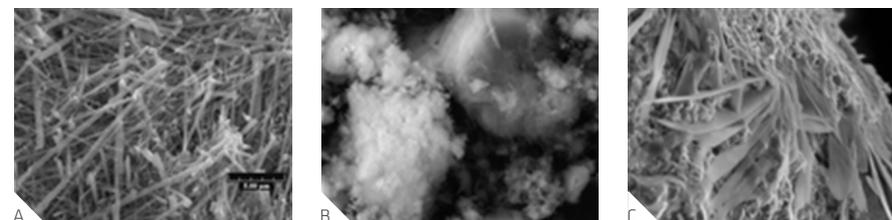


Fig 4.1: Imagens de microscopia eletrônica de varredura de A) etringita (sulfoaluminato de cálcio hidratado), B) hidratos de silicato de cálcio e aluminato de cálcio (CSH, AFm), e C) de portlandita (CH).

Características do concreto projetado que são atingidas com a ajuda do cimento na mistura são:

- Plasticidade/bombeabilidade da mistura base
A pasta (incluindo cimento, adições, todos os finos da composição de dosagem, e água) atua como o principal lubrificante. O cimento é o componente predominante e largamente responsável pelas propriedades reológicas da pasta. As partículas agregadas da mistura de concreto projetado são cobertas pela pasta e podem, assim, deslizar umas sobre as outras. A mistura torna-se em um material plástico e fluido que pode ser bombeado. Além disso, a pasta também é importante para lubrificar a interface da mistura de concreto com as tubulações. Na projeção via úmida, esses efeitos lubrificantes são altamente importantes para o transporte de concreto até o bico de projeção.



■ Aderência ao substrato

Uma vez que o concreto projetado atinge o substrato a uma velocidade muito alta, inicialmente todos os agregados graúdos refletem e uma fina camada de pasta de cimento é inicialmente formada, a qual age como uma ponte de ligação entre o substrato e a camada de concreto projetado. Esta pasta é pressionada para dentro de pequenas fissuras e vazios, resultando em uma camada de forte ligação.

■ Pega e endurecimento

Posteriormente à projeção, a pasta de cimento atua como a “cola” da mistura de concreto projetado aplicado. Ela incorpora e liga a matriz de agregados em um curto espaço de tempo e, assim, contribui significativamente para as propriedades mecânicas do concreto projetado jovem e maduro.

Para o concreto projetado, em contraste com o concreto convencional, a reação normal de hidratação de cimento é adicionalmente interligada à química do acelerador. A reação de aceleração muito rápida depende fortemente da reatividade do cimento e sua solução de cimento na mistura fresca. Portanto, o cimento deve ser cuidadosamente aprovado para sua aptidão ao uso em concreto projetado.

Normalmente, o teor de cimento em concreto projetado é de cerca de 400 - 500 kg/m³ (ou até cerca de 100 kg de substituição por adições). A quantidade exata de ligantes depende do processo de projeção e requisitos do concreto projetado.

4.3 ÁGUA

A terceira maior fração em massa de uma mistura de concreto projetado é a água. Afeta principalmente em duas questões:

- Na mistura a água determina (junto com os aditivos para concreto) a consistência/plasticidade do concreto.

- No concreto projetado aplicado, a água é tanto o meio de reação quanto um reagente dos processos químicos que causam o enrijecimento e o endurecimento do concreto projetado, tanto a reação inicial de aceleração quanto o processo contínuo de hidratação do cimento.

Dependendo da disponibilidade na usina de concreto, a água de dosagem do concreto projetado é obtida a partir de:

- Água da rede de abastecimento
- Água de reaproveitamento
- Água natural superficial ou subterrânea

Com base em sua fonte, a água de amassamento pode ter uma contaminação iônica, que pode então ser introduzida ao concreto. Deste modo, a química particularmente sensível da aceleração e hidratação do concreto projetado pode ser afetada negativamente. Consequentemente, é preciso prestar atenção especial para a contaminação, o que pode afetar negativamente a qualidade do concreto projetado, incluindo:

- | | |
|---|---|
| ■ Óleos e graxa | → retardo da hidratação |
| ■ Cloretos | → corrosão dos reforços de aço |
| ■ Sulfatos | → distúrbio nas reações de aceleração e de hidratação |
| ■ íons Ca ²⁺ e/ou Al ³⁺ | → distúrbio nas reações de aceleração e de hidratação |
| ■ Açúcares | → retardo da hidratação |
| ■ Sais | → redução da durabilidade |

Especialmente quando a fonte de água é recuperada de processos de concretagem no local (por exemplo, água reciclada), as propriedades químicas da água devem ser monitoradas de perto, pois quaisquer substâncias dissolvidas nela, podem variar consideravelmente ao longo do tempo e pode afetar a química de aceleração e hidratação de cimento.

No que diz respeito à qualidade do concreto projetado e ao desempenho geral, a quantidade e a qualidade da água devem ser absolutamente levadas em consideração.

4.4 ADIÇÕES

As finas adições minerais para concreto são normalmente divididas em adições quimicamente reativas e quimicamente não reativas. Deve-se notar, no entanto, que não se pode fazer uma distinção simples e clara entre a reatividade química ou a não reatividade dessas adições em concreto. Em vez disso, como pode ser visto nas adições pozolânicas mencionadas a seguir e as novas microcalcitas, morfologia e cristalinidade têm uma influência significativa na reatividade individual.

4.4.1 ADIÇÕES REATIVAS

Adições reativas ou materiais cimentícios suplementares, como adição ou como substituição de parte do cimento, contribuem para as propriedades do concreto devido às suas propriedades hidráulicas ou pozolânicas. São utilizadas por várias razões e, portanto, podem diferir consideravelmente em suas características. Eles podem ser adicionados ao concreto projetado a fim de:

- Suplementar o balanço de finos $\leq 0,125$ mm para volume ótimo de pasta (melhoria de lubrificação e bombeabilidade)
- Melhorar a durabilidade (densidade, resistência à ataques químicos)
- Aumentar a capacidade de retenção de água (estabilização da mistura)
- Substituir parte do cimento (redução da pegada de CO_2 , otimização de custo)

Muitos tipos diferentes de finos quimicamente reativos são usados. Um fator importante na seleção dessas adições são seus custos ou até mesmo sua disponibilidade local. Os três seguintes são exemplos de adições reativas e silicosas comumente utilizadas. Devido à sua natureza química, todos exibem reatividade química hidráulica latente ou pozolânica.

Silica Ativa

A sílica ativa é SiO_2 amorfo oriundo como um subproduto na produção de silício. Este material extremamente fino tem uma enorme área de superfície específica e, devido a isso, é altamente reativo. Melhora a coesão da mistura, reduz a reflexão durante a projeção, incrementa as resistências à compressão finais e melhora a durabilidade do concreto projetado aplicado em relação à resistência ao gelo/degelo e ataques químicos.

Cinza Volante

A cinza volante é obtida a partir dos filtros elétricos em termelétricas de queima à carvão. Sua qualidade depende fortemente do tipo de carvão utilizado. Concreto projetado com cinza volante tem a trabalhabilidade melhorada, uma redução na evolução de calor e resistências devido às características pozolânicas das cinzas volantes. Devido à sua disponibilidade atual e preço relativamente baixo, a cinza volante é frequentemente usada para melhoria da durabilidade do concreto projetado.

Escória

A escória ou escória granulada de alto-forno é uma partícula muito fina subproduto de altos fornos durante a produção de ferro gusa. É amplamente utilizado como adição em concreto projetado para reduzir o custo do cimento e alcançar maior densidade do concreto projetado, reduzir a permeabilidade e melhorar a resistência à ataques químicos. O ganho de resistência inicial é mais lento com a escória.

NOVAS TENDÊNCIAS EM ADIÇÕES REATIVAS

Argilas calcinadas

As matérias-primas secundárias são limitadas em termos de sua disponibilidade em quantidade e qualidade pelos processos os quais elas se baseiam. Os materiais aglomerantes alternativos, no entanto, devem ser baratos, fáceis e disponíveis a longo prazo, e seu fornecimento deve permitir uma substituição razoável de clínquer em termos de desempenho do concreto projetado, sustentabilidade e redução de CO_2 . Como um novo tipo de adições reativas, as argilas calcinadas recentemente atraíram interesse. As fontes naturais de argilas mistas estão disponíveis globalmente e exibem boas propriedades pozolânicas após processo de calcinação a cerca de 700-800 °C. No caso das argilas calcinadas, as condições de calcinação significativamente mais moderadas, bem como a descarbonização evitada por esses materiais resultam em uma economia potencial de até 30% de CO_2 .

Até cerca de 25% de clínquer pode ser substituído por este tipo de material cimentício suplementar sem perda da reatividade do cimento, mas alcançando as mesmas propriedades aglomerantes e maior durabilidade. Em combinação com outras adições como filler calcário e gipsita, a substituição do clínquer pode ser aumentada até cerca de 50% com um desenvolvimento de resistência ainda comparável.

Micro Filler calcítico

O filler calcário que é tipicamente considerado como uma adição inerte pode se comportar completamente diferente quando seu tamanho de partícula é substancialmente reduzido em comparação com o filler utilizado habitualmente. O chamado "efeito filler" pode ser observado especialmente em um concreto projetado acelerado livre de álcalis para filler micro calcítico com tamanho médio de partícula $d_{50} << 10 \mu m$.

Esse filler calcário fino não atua apenas como adições inertes, mas também agem como sementes de cristalização e, devido à sua alta superfície específica, contribuem quimicamente para as reações que ocorrem durante o desenvolvimento de resistência inicial do concreto projetado acelerado sem álcalis. Os efeitos adversos da substituição de clínquer sobre o desempenho do concreto projetado podem, portanto, ser compensados, ou seja, enrijecimento inicial reduzido e hidratação inicial do cimento.

Tabela 4.2: Características de adições quimicamente reativas em concreto projetado

| Efeito sobre | Modo de Ação | Pozolânico | | Hidráulico Latente | | Inerte | |
|----------------------------------|--------------|--|---|------------------------|--|---------|---|
| | Tipo | Cimento | Silica Ativa | Cinza Volante (Tipo V) | Cinza Volante (Tipo W) | Escória | Filler calcário |
| Concreto fresco | | | | | | | |
| Manuseio | | ++ | ++ | ++ | +++ | + | +++ |
| Capacidade de Retenção de Água | | ++ | +++ | + | + | + | ++ |
| Resistência à Compressão | | | | | | | |
| Resistência Muito Inicial 0-2h | | +++ | + | + | - | - | +/- |
| Resistência Inicial 2-12h | | ++ | ++ | + | - | - | +/- |
| Resistência Final (90 d) | | ++ | +++ | ++ | ++ | +++ | +/- |
| Durabilidade | | | | | | | |
| Resistência à penetração de água | | ++ | +++ | ++ | ++ | ++ | + |
| Resistência à Sulfatos | | - | ++ | +/- | +/- | +++ | +/- |
| | | Tipo e consumo do cimento influenciam a trabalhabilidade e o desenvolvimento de resistências | "Melhoria da durabilidade, aumento da resistência de aderência e as propriedades mecânicas. Redução do valor do pH da água intersticial do concreto e, portanto, deve limitar-se a sua quantidade." | | Desacelera o desenvolvimento de resistências e aumenta a durabilidade. | | Não desenvolve resistência, mas ajuda na melhoria do empacotamento de partículas. |

+ melhoria - piora

4.4.2 ADIÇÕES NÃO REATIVAS

Em contraste com as adições reativas, os fillers quimicamente inertes não reagem no ambiente químico do concreto e não interagem com o processo de hidratação do cimento. Tipicamente, estes são fillers finos, como pó de quartzo ou calcário, que devido à sua distribuição de tamanho de partículas são usados para obter um teor adequado de finos ou uma microestrutura otimizada da mistura.

4.5 ADITIVOS PARA CONCRETO PROJETADO

Aditivos são usados para melhorar e/ou alterar propriedades do concreto projetado, que são difíceis ou impossíveis de controlar pela mera combinação isolada de cimento, agregados e água. A adição de aditivos ao concreto projetado ocorre durante a preparação da mistura. De acordo com a EN 206 e com a NBR 11768-1, aditivos podem ser adicionados ao concreto em uma dose < 5% sobre a massa de ligante total. Se a quantidade total de aditivos for acima de três litros por metro cúbico de concreto, a água introduzida pelos aditivos também deve ser considerada no cálculo do teor total de água da mistura de concreto.

Como característica especial do concreto projetado, o acelerador só é adicionado no mangote durante o processo de projeção. Sua dosagem máxima de acordo com a EN 934-5 é limitada a 12% sobre a massa de ligante total. Nem a NBR11768-1 e nem a NBR14026 que estabelece os critérios e as condições adotadas para aplicação de concreto projetado estabelecem um limite superior de dosagem para aceleradores de pega.

Tabela 43: Principais propriedades do concreto projetado e aditivos ou adições para melhorá-las

| Especificações do Concreto Projetado | Parâmetros de Controle | Aditivos para concreto para atendimento de especificações |
|--|-------------------------------------|--|
| Resistência à compressão Resistência à flexão Durabilidade | Características de pega do concreto | Superplastificante Adições Fibras Agentes de cura |
| Bombeabilidade Capacidade de projeção | Trabalhabilidade | Aditivos modificadores de viscosidade Adições Superplastificante |
| Desenvolvimento de resistência | Pega e endurecimento | Aceleradores para concreto projetado Superplastificante |
| Tempo de trabalhabilidade | Tempo em aberto | Retardadores de pega |

Existem três aditivos chaves usados no concreto projetado: superplastificantes, retardadores e aceleradores para concreto projetado, os quais são crucialmente importantes com relação ao manuseio, segurança e qualidade final do concreto projetado. Estes três da ampla gama de aditivos existentes para concreto projetado são descritos em mais detalhes abaixo.

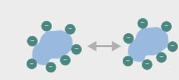
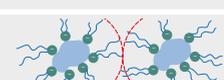
4.5.1 SUPERPLASTIFICANTE

Juntamente com o acelerador para concreto projetado, o superplastificante (reductor de água de alto range/ reductor de água tipo II) é o aditivo de concreto mais importante para uso em concreto projetado via úmida. A relação água/ligante total é geralmente definida como 0,50, mas uma relação menor ou igual a 0,48 é preferencial para o desempenho e qualidade ideal do concreto projetado.

Além disso, o tempo de trabalhabilidade e a coesão interna do concreto fresco são influenciados pelo RA2. A composição do superplastificante, em especial a escolha do ingrediente ativo polimérico, também influencia o desempenho do acelerador para concreto projetado. Para o concreto projetado, superplastificantes específicos são formulados (linha Sika® ViscoCrete® SC) para atender aos requisitos do concreto projetado, ou seja, tempo de trabalhabilidade prolongado, incorporação de ar aprimorada e bombeabilidade. Todas as propriedades referidas abaixo são predominantemente determinadas pela dosagem do concreto, que é influenciada e controlada pelo superplastificante personalizado para concreto projetado:

- Redução de água para melhorar o desempenho do concreto projetado, resistência à compressão e durabilidade ao mesmo tempo que se consegue uma trabalhabilidade ótima.
- Trabalhabilidade (baixa viscosidade/suavidade) para melhor grau de enchimento dos pistões da bomba, gerando assim menos pulsação e uma mistura homogênea do concreto com o acelerador para concreto projetado no bico de projeção.
- Incorporação de ar, o que permite a um concreto com baixa relação água/ligante total ter um melhor bombeamento e uma mistura mais homogênea no bico de projeção.
- Tempo de trabalhabilidade da mistura base do concreto projetado conforme as necessidades específicas da obra.
- Os modos químicos de ação dos redutores de água tipo 2, aceleradores para concreto projetado e quaisquer outros aditivos usados no concreto projetado devem ser otimamente compatíveis uns aos outros.

Tabela 4-4- Tipos de plastificantes/superplastificantes

| | Base química | Potencial de redução de água* | Efeito |
|---------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--|
| Red. de água tipo 1 (RA1) | Carboidrato/ Lignosulfonato | 5 -12% | Forças eletrostáticas:  |
| Red. de água tipo 2 (RA2) | Naftaleno e Melamina | 5 - 25% | |
| | Policarboxilato (PCE) | 12 - 40% | Electrostática e repulsão estérica:  |

Os superplastificantes mais recentes para concreto projetado, atingindo todos esses requisitos, são baseados nos éteres de policarboxilato mais recentes (PCE). A principal característica da tecnologia de superplastificantes baseados em PCE é sua capacidade para formulação eficiente e personalizada de polímeros para atingir propriedades específicas do concreto projetado.

4.5.2 RETARDADOR DE PEGA/ESTABILIZADOR DE CONSISTÊNCIA

A maior parte do concreto projetado é usada em túneis e mineração, onde os principais desafios logísticos também existem e, portanto, os tempos de trabalhabilidade do concreto devem ser os mais flexíveis possível. Isso é conseguido em concreto projetado de forma muito eficaz porque a pega inicial e desenvolvimento de resistência podem ser, por um lado, controlados individualmente com a ajuda de aditivos retardadores de pega na mistura, e por outro pelo acelerador para concreto projetado adicionado independentemente no bico de projeção. Como resultado, a trabalhabilidade pode ser estendida por muitas horas e então, as outras operações logísticas como a produção de concreto, transporte, tempo de espera, processo de instalação e pausas de trabalho etc., também podem ser adequadamente planejadas e controladas.

Retardadores de pega SikaTard® são dedicados para uso em concreto projetado. Eles permitem que quase todos os tempos de trabalhabilidade do concreto sejam alcançados de três horas para além de 24 horas, apenas alterando a dosagem na faixa de cerca de 0,1% para 1,0% sobre a massa de ligante total. Naturalmente, os efeitos específicos do tempo também dependem fortemente de outros parâmetros-chave, por exemplo, o processo de dosagem do concreto, o tipo de cimento/ligante e as condições de temperatura.

Independentemente do tempo de trabalhabilidade definido pelo uso de SikaTard®, seu efeito é imediatamente compensado durante a aplicação do concreto projetado pelos aceleradores usuais de concreto projetado (Sika® Sigunit®). O cimento do concreto projetado então se comporta em grande parte como o cimento originalmente não retardado.

Tabela 4.5: Exemplo de uma extensão do tempo de trabalhabilidade mediante adições crescentes da dosagem de SikaTard®-g30 (deve ser determinado para cada caso individual).

| Tempo de trabalhabilidade aproximado | Dosagem típica de aditivo por massa de ligante total | |
|--------------------------------------|--|------------|
| | Sika® ViscoCrete®-SC | SikaTard® |
| 3 horas | 0,8 -1,3% Dependendo da relação água/ligante total | |
| 4 horas | 0,8 -1,3% | 0,2 - 0,4% |
| 8 horas | 0,8 -1,3% | 0,4 - 0,6% |
| 12 horas | 0,8 -1,3% | 0,6 - 0,8% |
| 24 horas | 0,8 -1,3% | 0,8 -1,3% |

4.5.3 ACELERADOR DE PEGA E ENDURECIMENTO PARA CONCRETO PROJETADO

Aceleradores livres de álcalis

Hoje, aceleradores livres de álcalis (AF) líquido tornaram-se o padrão para aplicações de concreto projetado altamente exigentes, em todo o mundo, devido às suas vantagens na aplicação e para a Segurança, Saúde e Meio Ambiente (SSMA). Esses produtos, que são baseados em soluções aquosas ou suspensões de compostos de sulfato de alumínio, são seguros e fáceis de manusear, especialmente no que diz respeito à dosagem constante, além de um desenvolvimento muito bom de resistências iniciais com características e propriedades ótimas de projeção.

Para o termo “livre de álcalis”, deve-se fazer distinção entre dois aspectos químicos e sua respectiva influência sobre as propriedades do concreto projetado:

■ Alcalinidade como sinônimo para basicidade

As soluções aquosas são alcalinas se seu valor de pH for maior que o pH 7. Materiais altamente alcalinos afetam a saúde e a segurança das pessoas no local durante seu uso, pois o tecido humano é muito mais sensível e está em risco a líquidos com pH altamente alcalino do que, por exemplo, a ácidos fracos. Os tradicionais assim chamados aceleradores alcalinos para concreto projetado, baseados em silicatos e aluminatos, exibem um pH extremamente alto de 11 ou mais.

O valor do pH de modernos aceleradores livres de álcalis, por outro lado, está na gama de ácidos fracos e é similar ao de refrigerantes como sucos de frutas ou bebidas que normalmente tem valores de pH entre 2,5-3,5.

■ Alcalinidade como uma medida do teor de íons álcalis

O teor de íons alcalinos, por exemplo, sódio e potássio, afeta fortemente propriedades do concreto. Com o aumento do teor de álcalis, a resistência à compressão final do concreto projetado é reduzida, bem como sua durabilidade a longo prazo.

O teor total de íons alcalinos dos aceleradores livres de álcalis, expresso como o Na₂O equivalente, deve ser inferior a 1,0% (conforme a EN 934-5). Já a NBR 11768-1 não impõe nenhuma restrição ao teor de álcalis equivalente para aceleradores de concreto projetado.

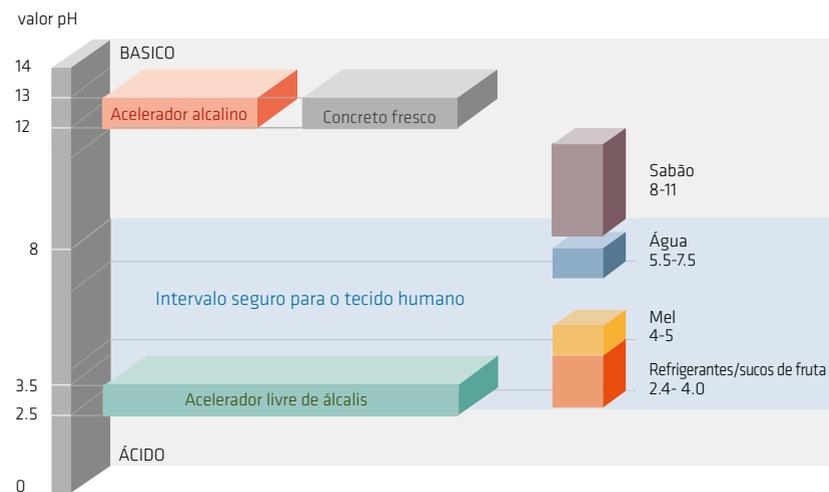


Fig. 4.2: Intervalo de pH de aceleradores para concreto projetado

Os aceleradores de concreto projetado livres de álcalis, em contraste com os aceleradores alcalinos discutidos abaixo, proporcionam melhor saúde e segurança com mais segurança em muitas áreas:

■ Trabalho seguro:

Devido à acidez fraca dos aceleradores AF de aprox. pH 3, não ocorrem névoa de água cáustica e aerossóis no ambiente do túnel e, portanto, não há danos cáusticos para a pele, sistema respiratório e olhos das pessoas. Os aceleradores livres de álcalis para concreto projetado não são perigosos durante o transporte, armazenamento, manuseio ou dosagem.

■ Ambiente seguro:

Com o uso de aceleradores livres de álcalis, não há perigo de materiais altamente alcalinos ou resíduos serem descarregados no solo ou água de drenagem.

■ Qualidade e Durabilidade melhoradas do concreto projetado:

O uso de aceleradores livres de álcalis quase não tem efeito adverso sobre a resistência à compressão do concreto projetado.

Quase nenhum íon alcalino, solúvel adicional, é introduzido ao concreto. Isso reduz consideravelmente o risco de lixiviação do concreto projetado e consequentes bloqueios nos sistemas de drenagem.

Química nos aceleradores livres de álcalis para concreto projetado

Considerando que para o concreto fresco se requer uma trabalhabilidade muito boa, quer dizer, para fluidez e bombeabilidade, as propriedades do concreto projetado recém-aplicado são totalmente inversas a isto. Uma resistência imediata deve ser alcançada a qual permite aplicações verticais e sobre a cabeça de camadas de concreto projetado razoavelmente espessas que são fortes o suficiente para suportar seu próprio peso.

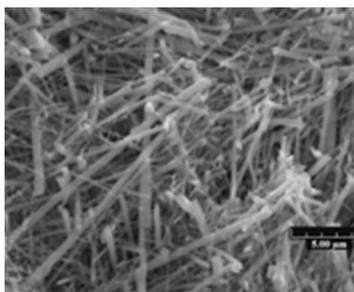
Qualquer retardo da hidratação do cimento pode levar a um colapso retardado da camada do concreto projetado devido a efeitos secundários, por exemplo, fluência ou infiltração de água.

O desempenho inicial do concreto projetado acelerado sem álcalis se remonta essencialmente por dois processos químicos, em sua maioria sucessivos:

1. Reação de aceleração até aprox. 2 horas desde projetado

Começa imediatamente com o acelerador sendo misturado ao concreto no bico de projeção, havendo uma formação muito pronunciada de etringita. Esta precipitação de etringita cria uma matriz sólida, que é forte o suficiente para permitir a aplicação segura do concreto projetado.

No entanto, por razões químicas e técnicas, a resistência à compressão resultante desta reação primária do concreto projetado não costuma exceder cerca de 1,5 MPa. Em virtude de fatores potencialmente prejudiciais para o concreto recém projetado, por exemplo, forças de carga estática (aplicação aérea) ou entrada de água, esse ganho inicial de resistência deve ser seguido por um processo de endurecimento subsequente por causa da contribuição da hidratação de silicato de início precoce como uma reação secundária do concreto projetado.



2. Reação de hidratação do cimento.

Como no concreto comum, a hidratação do cimento contribui para o desenvolvimento da resistência do concreto recém projetado, que em particular pode ser observado a partir de cerca de duas a três horas após a projeção. Qualquer estabilização/retardo da mistura que foi alcançada com a ajuda de outros aditivos, por exemplo, os superplastificantes e retardadores etc., é desativado após a adição do acelerador livre de álcalis. A hidratação contínua do cimento no concreto projetado (2-24 horas) é essencialmente não afetada por quaisquer aditivos que tenham sido adicionadas no processo de carga e preparo.

O início da reação de hidratação do cimento (pega do cimento) é, na verdade, também transladada para tempos mais precoces em comparação com a mistura original (sem o acelerador livre de álcalis).

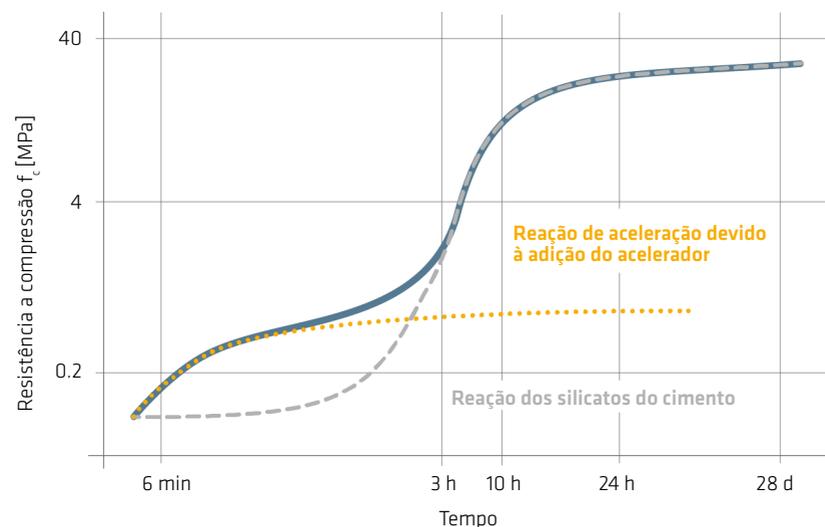


Fig. 4.3: Desenvolvimento de resistência à compressão de concreto projetado jovem e suas causas químicas

Em relação à aceleração do concreto projetado e ao desenvolvimento de resistências iniciais, duas questões devem ser consideradas com cuidado - o que infelizmente nem sempre é o caso:

■ A cinética de aceleração e hidratação do cimento

Além da reação de aceleração, a reação de hidratação do cimento desempenha um papel importante no desenvolvimento de resistência inicial do concreto projetado. Como qualquer reação química, ambos dependem fortemente da temperatura do concreto e do ambiente. Como regra geral, a cinética das reações químicas, como medida de sua "velocidade", muda por um fator de dois a três com uma mudança de temperatura de 10 °C. Assim, uma mistura de concreto projetado a uma temperatura de 10 °C em vez dos 20 °C recomendados tem um impacto dramaticamente adverso no desempenho do concreto projetado.

■ O teor de água da mistura de concreto projetado

Não apenas o desempenho inicial do concreto projetado, mas também sua qualidade/durabilidade final é fortemente afetada pelo conteúdo de água da mistura, caracterizada pela relação água/ligante total. Água é necessária para as propriedades plásticas do concreto no estado fresco e para a hidratação do cimento. No entanto, qualquer excesso de água no desenho da mistura, além do necessário para a hidratação do cimento, reduz a evolução das resistências iniciais, bem como a resistência à compressão final e densidade do concreto projetado.

NOTA: Ao avaliar um concreto projetado de baixo desempenho, o teor de água da mistura deve ser altamente priorizado. Apenas uma medição significativa deste teor de água da mistura pode dar uma ideia realística da relação água/ligante total real.

MUDANÇA DA RELAÇÃO ÁGUA/LIGANTE TOTAL DEVIDO À ADIÇÃO DO ACELERADOR

Entre os aditivos, as doses habituais do acelerador são de longe as de maior quantidade. Portanto, muitas vezes se discute que a água adicional do acelerador no bico de projeção precisa ser considerada em termos de relação água/ligante total do concreto projetado final.

Para avaliar esta questão corretamente, deve-se considerar não apenas o conteúdo adicional da água devido à adição do acelerador, mas também as reações químicas da aceleração. No decorrer desses processos no concreto projetado jovem a relação água/ligante total dada pela água de amassamento muda devido ao consumo químico de água (ver Fig. 4.4).

Durante a aceleração do concreto projetado os compostos de alumínio adicionados pelo acelerador, sob o ambiente químico específico do concreto projetado jovem, produzem uma forte precipitação de etringita. Etringita, no entanto, é um mineral que contém grandes quantidades de água, cerca de 46% de sua própria massa. Ainda em uma fase em que o concreto projetado deve ser considerado um material viscoelástico, essa água é removida da mistura de concreto projetado, resultando em uma redução efetiva da relação água/ligante total.

Para aceleradores livres de álcalis, pode-se, portanto, afirmar que esses aditivos não aumentam a relação água/ligante total efetiva do concreto projetado aplicado, mas mesmo reduzem-na.

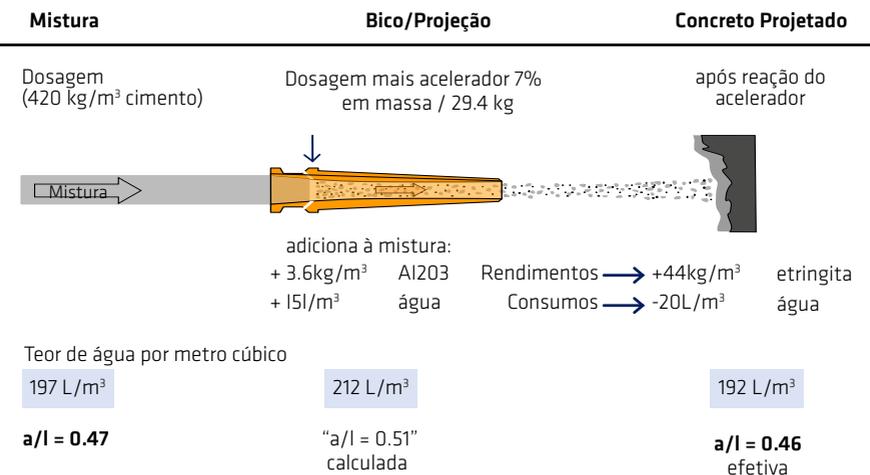


Fig. 4.4: Exemplo da mudança da relação água/ligante total (a/l) ao curso da aplicação do concreto projetado com um acelerador AF (mesmo negligenciando a mudança de volume).

Aceleradores Alcalinos

Além do atual estado da arte da tecnologia de aceleradores livres de álcalis, discutida anteriormente, existem tipos mais antigos de aceleradores líquidos que ainda são usados em muitos países, ou seja, baseados em soluções alcalinas aquosas de silicato ou aluminato. Estes não são livres de álcalis, contém quantidades relativamente altas de íons alcalinos e são líquidos básicos. As interações químicas que ocorrem no concreto projetado ao usar esses aceleradores diferem significativamente das descritas anteriormente para os aceleradores livres de álcalis. Embora os aceleradores alcalinos geralmente produzam um bom desenvolvimento de resistência inicial, as propriedades do concreto projetado final se tornam piores, por exemplo, a resistência à compressão final é substancialmente reduzida e a lixiviação de sais alcalinos, que também podem causar bloqueios nos sistemas de drenagem, é comum. A durabilidade do concreto projetado, em geral, é um problema devido às grandes quantidades de íons alcalinos introduzidos à mistura pelo acelerador, resultando no aumento significativo do risco de reação álcali-silicato.

Além dessas diferenças técnicas e de desempenho, o uso de aceleradores alcalinos também tem os efeitos adversos previamente mencionados acerca dos problemas de saúde e segurança durante a aplicação. Devido à sua alta alcalinidade (valor do pH), esses produtos apresentam o risco de queimaduras ao tecido humano, particularmente o trato respiratório e os olhos. Isso se aplica tanto ao contato direto (pele, olhos) quanto à névoa aérea desses aceleradores em um ambiente de túnel que pode ser extremamente prejudicial via respiração normal.

Tabela 4.6: Tipos de aceleradores líquidos e suas principais propriedades

| Propriedades | Tipo do Acelerador | | |
|---|--------------------------|-------------------------|------------------|
| | Alcalino Base Aluminatos | Alcalino Base Silicatos | Livre de Álcalis |
| Intervalo de Dosagem | 3 - 6 % | 12 - 15 % | 4 - 7 % |
| Valor de pH | 13 - 14 | 12 - 13 | 3 |
| Na ₂ O equivalente | 20 % | 12 % | < 1 % |
| Resistência muito inicial sob mesma dosagem | ++++ | ++++ | ++ |
| Resistência Final | + | -- | +++ |
| Comportamento de lixiviação | --- | -- | - |
| Saúde, Segurança e Meio Ambiente | -- | - | +++ |
| | + benéfico | - prejudicial | |

Tabela 47: Tipos distintos de aceleradores para concreto projetado e seus principais usos

| Tipo | Produto | Uso/Efeito | Observações |
|---------------------------------|--------------|--|---|
| Líquido livre de álcalis | Sigunit®-AFL | <ul style="list-style-type: none"> Estabilização de tetos em túneis Estabilização de rochas e taludes Revestimento de concreto projetado de alta qualidade Alta resistência inicial Melhores propriedades de lixiviação Melhor saúde e segurança | <ul style="list-style-type: none"> Para processos de projeção via seca ou úmida Ótima resistência final Pós instantâneos são usados como soluções de aprox. 55% Não misturar com aceleradores alcalinos Tubulações e containers devem ser resistentes à ácido/corrosão |
| Pó instantâneo de livre álcalis | Sigunit®-AFI | | |
| Pó, livre de álcalis | Sigunit®-AF | | |
| Líquido, alcalino | Sigunit®-L | <ul style="list-style-type: none"> Estabilização de tetos em túneis Estabilização de rochas e taludes Resistência inicial muito elevada | <ul style="list-style-type: none"> Para processos de projeção via seca ou úmida Resistência final reduzida Agressivo ao tecido humano |

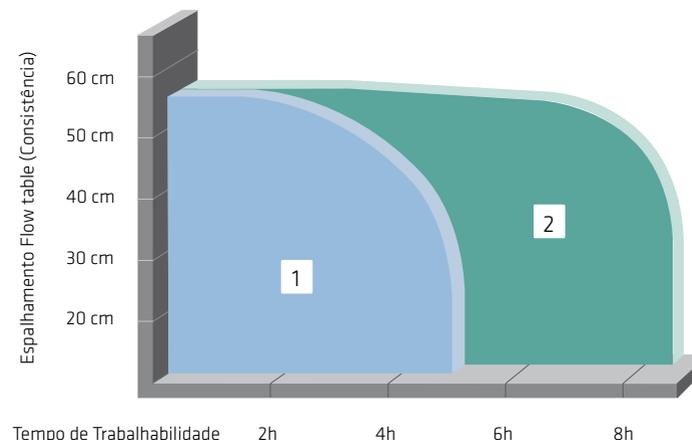


Fig. 4.5: Tempo de trabalhabilidade de misturas de concreto projetado via úmida com superplastificante base PCE Sika® ViscoCrete® SC (1) e com uma combinação de Sika® ViscoCrete® SC e retardador para concreto projetado SikaTard®-930 (2).

Tabela 4.8: Tabela resumo dos aditivos para concreto projetado

| Tipo | Acelerador | Superplastificante | Retardador/Estabilizador | Sílica ativa | Auxiliar de bombeamento | Agente Lubrificante | Fibras |
|--------------|---|---|---|--|---|--|--|
| Produto | Sika® Sigunit® | Sika® ViscoCrete® | SikaTard® | SikaFume® | Sika® Stabilizer Pump | SikaPump®-Start 1 | SikaFiber® Force |
| Efeito sobre | Mistura | <ul style="list-style-type: none"> Alta redução de água Melhor trabalhabilidade Tempo controlado de trabalhabilidade | <ul style="list-style-type: none"> Tempo de trabalhabilidade ajustável | <ul style="list-style-type: none"> Melhoria da homogeneidade do concreto fresco | <ul style="list-style-type: none"> Melhoria da homogeneidade e coesão interna da mistura | | |
| | Aplicação | <ul style="list-style-type: none"> Lançamento do concreto sem formas Desenvolvimento de alta resistência inicial | <ul style="list-style-type: none"> Bombeabilidade melhorada (incorporação de ar) Potencial de menor relação a/l (melhor desenvolvimento de resistência) | <ul style="list-style-type: none"> Sem limpeza de equipamentos durante a fase de retardo | <ul style="list-style-type: none"> Menor reflexão | <ul style="list-style-type: none"> Aumento do rendimento de projeção com menor consumo de energia | <ul style="list-style-type: none"> Reduz a fricção inicial entre a mistura e as linhas de concreto Substitui a nata de cimento como agente lubrificante da bomba |
| | Concreto projetado no estado endurecido | | <ul style="list-style-type: none"> Melhor retração e fluência Maior impermeabilidade | | <ul style="list-style-type: none"> Impermeabilidade muito maior Aderência melhorada entre agregados e cimento endurecido Alta resistência ao gelo/degelo | | |
| Observações | Adição no bico de projeção | <ul style="list-style-type: none"> Efeito ótimo quando adicionado após a água de amassamento A dosagem depende da composição e matérias primas Para propriedades específicas, testes preliminares com cimento e agregados são essenciais | | <ul style="list-style-type: none"> Cura adequada é necessária porque a sílica ativa seca a superfície do concreto projetado | Recomendado para misturas problemáticas, com finos variáveis, baixo consumo de cimento ou com distribuição granulométrica deficiente | A mistura lubrificante não deve ser pulverizada no substrato da aplicação do concreto projetado | Fibras afetam as propriedades de trabalhabilidade e bombeabilidade das misturas de concreto projetado |

4.6 FIBRAS NO CONCRETO PROJETADO

As fibras podem ser usadas como reforço para o concreto distribuídas uniformemente por toda a seção transversal do concreto. O efeito da fibra sobre o concreto depende do tipo de fibra, do material, sua forma e dimensões. Basicamente existem dois tipos de fibras:

- **Micro fibras** (fibras pequenas, finas, monofilamento ou fibriladas, $d < 0,30$ mm)
O uso de micro fibras pode influenciar as propriedades do concreto projetado jovem pela redução das fissuras de retração nas primeiras idades. Além disso, o uso de microfibras de PP tem um efeito anti-spalling ao fundir e aumentar o espaço vazio para expansão do vapor, quando o concreto é exposto a temperaturas elevadas em casos de incêndio.
- **Macro fibras** (fibras longas com um diâmetro maior, $d > 0,30$ mm)
Usadas principalmente como reforço das propriedades do concreto endurecido, como o aumento da tenacidade à flexão, absorção de energia e resistência ao impacto.

O uso de fibras no concreto projetado torna-se cada vez mais comum à medida que os engenheiros, proprietários e construtores veem as vantagens do uso de fibras como substituição parcial ou total do reforço em tela de aço do concreto projetado para suporte temporário do solo. Os benefícios das fibras em vez de medidas de reforço habituais para o suporte subterrâneo em túneis e mineração são:

- Condições de trabalho mais seguras (sem montagem de malha em área insegura)
- Progresso de trabalho mais rápido (sem instalação adicional de malhas de aço)
- Sem sombras de projeção por trás das malhas de aço
- Fibras são distribuídas homogeneamente
- Reforço fornecido pelo produtor de concreto
- Sem reflexão devido à vibração da tela de aço

As fibras de aço em concreto projetado já são conhecidas há muito tempo e frequentemente usadas em obras de túneis e mineração. Há unidades dosadoras disponíveis que podem ser instaladas nas usinas de concreto e há experiência no procedimento de mistura para a produção de um concreto projetado reforçado com fibras trabalhável. Mas as fibras de aço também têm suas desvantagens, como o grande peso (manuseio) das fibras, o aumento dos custos de desgaste dos equipamentos devido à abrasão ou picos pontiagudos na superfície do concreto projetado (lesão cutânea, danos às membranas de impermeabilização).

Então uma alternativa podem ser as fibras poliméricas. Com fibras poliméricas os mesmos valores de absorção de energia podem ser alcançados e, dependendo do tipo de fibra, pode ser uma alternativa econômica. Os benefícios das fibras poliméricas em vez de fibras de aço para o túnel são:

- Menores custos de desgaste devido à menor abrasão dos equipamentos
- Menor peso para transporte até a planta dosadora
- Não corrosiva, portanto creditável como reforço a longo prazo mesmo na presença de água
- Fibras poliméricas são mais suaves e flexíveis, o que reduz o risco de lesões aos trabalhadores
- Membranas de impermeabilização podem ser instaladas diretamente sobre a camada de concreto projetado reforçado com fibras poliméricas

Além do uso pretendido para melhoria da capacidade de carga do concreto projetado, a inclusão de fibras afeta todo o ciclo de trabalho do concreto projetado (ver Tabela 4.8).

- **Trabalhabilidade e dosagem:**
As fibras reduzem a trabalhabilidade do concreto fresco à medida que introduzem uma área superficial adicional que requer pasta extra para lubrificação (finos, ligantes, água). A dosagem deve ser adaptada em relação ao volume de pasta quando as fibras são usadas.
- **Bombeabilidade:**
Geralmente, a passagem do concreto com fibras através da grelha da bomba e pelas tubulações limita os comprimentos máximos das fibras e seu teor de dosagem. Como regra geral, o comprimento das fibras deve ser mais da metade do diâmetro da tubulação, uma vez que fibras mais longas se orientarão ao longo do curso do mangote, enquanto que as menores são capazes de girar, o que pode resultar em "ouríços" de fibras e entupimentos da tubulação.



Fig. 4.6: Fibras de PP distribuídas uniformemente em uma amostra de teste de projeção rampada.



Fig. 4.7: Fibras de aço para melhoria da absorção de energia do concreto



Fig. 4.8: Fibras SikaFiber® Force-60 PP dosadas automaticamente na produção de concreto projetado como discos envoltos por filme hidrossolúvel.

■ **Absorção de Energia:**

Concreto e concreto projetado geralmente exibem um comportamento frágil. A deformação, a qual pode ser resistida pelo concreto à compressão e especialmente à tração é limitada. Para alcançar um aumento do nível de ductilidade do concreto ou concreto projetado, podem ser adicionadas fibras estruturais.

Com a adição de fibras o comportamento frágil do material é estendido para um comportamento dúctil, uma vez que as fissuras no concreto são limitadas e/ou ponteadas, com algumas forças tomadas ou transferidas pelas fibras. A ductilidade da estrutura de concreto é reforçada pelo arrancamento das fibras do concreto fissurado. Esse comportamento depende do tipo, geometria e material da fibra, além da dosagem da mistura de concreto e a dosagem de fibras. Por exemplo, as fibras de aço fornecem uma boa capacidade de suporte de carga dentro de um pequeno intervalo de deformação, enquanto as fibras poliméricas mostram uma capacidade crescente de carga sob maiores deformações.

■ **Durabilidade:**

A durabilidade do concreto projetado pode ser melhorada com o uso de fibras

- Micro fibras: menos fissuras por retração
- Fibras de aço: bom comportamento de fluência
- Macro fibras de PP: excelente resistência química

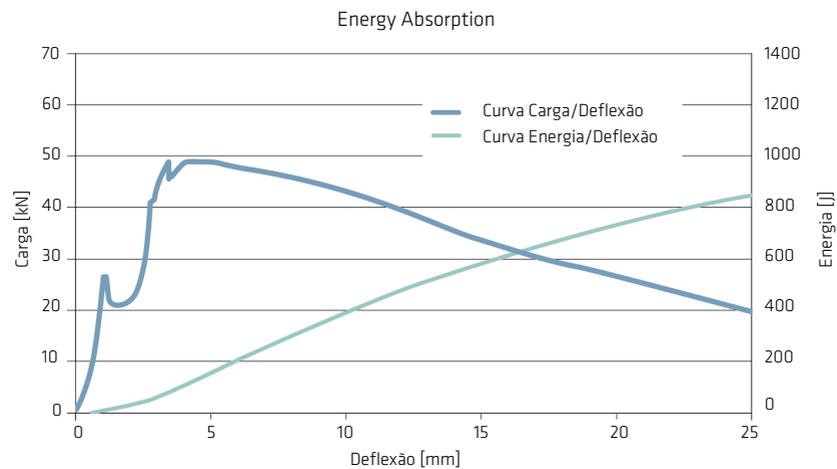


Fig. 4.9: Curva de carga deflexão de concreto projetado reforçado com fibras de aço (EN14488-5)

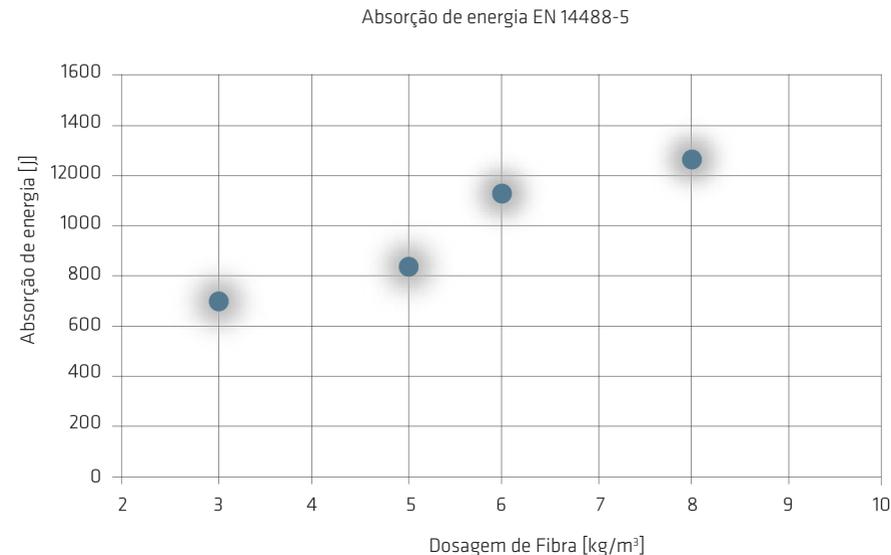


Fig. 4.10: Relação da absorção de energia com a dosagem de SikaFiber® Force-60, medida usando placas testes projetadas conforme a [4488-5

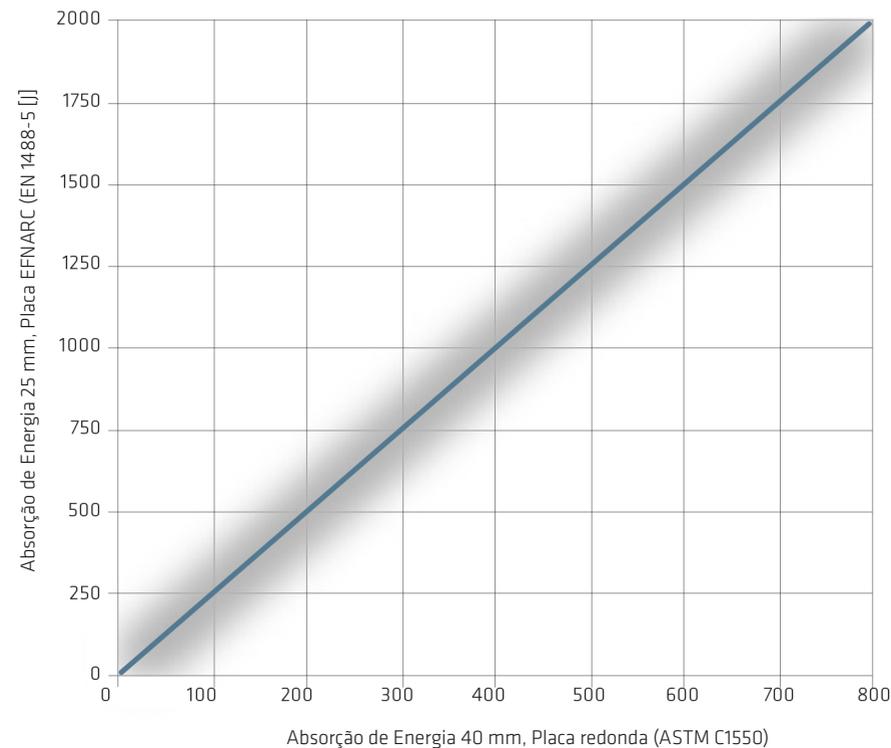


Fig. 4.11: Correlação de diferentes métodos de ensaio para medição da absorção de energia

5 DEFINIÇÃO DE CONCRETO PROJETADO POR MATERIAIS

Durante seus mais de 100 anos de história, a classificação do concreto projetado tornou-se menos consistente devido a processos e materiais adicionais. Distinção de diferentes tipos de concreto projetado é feito em relação aos materiais ou com relação à tecnologia de aplicação. Classificação de concreto projetado por materiais se distingue entre:

- **Concreto projetado via seca**
Toda a mistura, incluindo cimento, é fornecida pré-misturada e pronta para uso. Todos os componentes devem estar completamente secos e misturados antes da aplicação. Esta mistura é então transmitida pneumaticamente e a água necessária é adicionada no bico de projeção para produzir o concreto projetado via seca final.
- **Concreto projetado via semiúmida**
Semelhante ao concreto projetado via seca, mas usa areias e agregados convencionalmente disponíveis nas usinas de concreto, o qual é econômico, mas estes geralmente contêm níveis variáveis de umidade. Opcionalmente, um retardador é adicionado para evitar que o processo de hidratação do cimento comece antes da projeção. Esta mistura é transmitida pneumaticamente e a água necessária é adicionada no bico de projeção para produzir o concreto projetado via semiúmida final. No caso de um retardador adicionado à mistura, a adição de um acelerador também é necessária no bico de projeção para neutralizar o retardo anterior da mistura.
- **Concreto projetado via úmida**
Basicamente, a projeção via úmida usa um concreto já previamente pronto que é misturado em uma usina de concreto. Ele requer uma dosagem com aditivos, incluindo um superplastificante específico para concreto projetado e outros aditivos opcionais como retardadores, incorporadores de ar etc. A mistura úmida é bombeada para o bico de projeção e, embora não haja adição específica de água no bico, há sempre a adição de um acelerador de pega líquido para concreto projetado, que é mandatório para concreto projetado via úmida.

5.1. CONCRETO PROJETADO VIA ÚMIDA

Concreto projetado via úmida significa a entrega (manuseio) de um concreto previamente preparado que consiste em agregados, cimento, água e aditivos para concreto projetado em uma consistência trabalhável e bombeável. Durante o processo de projeção, o concreto úmido é misturado no bico de projeção com ar e o acelerador líquido para concreto projetado e, então, pode ser aplicado, o concreto projetado via úmida pode ser processado por fluxo denso ou aerado. O concreto projetado via fluxo denso é o processo mais recentemente desenvolvido, geralmente usado para concreto projetado de alto desempenho.

O concreto projetado via úmida é usado no processo de fluxo denso, especialmente quando grandes quantidades de concreto projetado têm que ser processadas. Também oferece o controle máximo de todos os parâmetros. Esta combinação é de longe a mais popular para obras de tunelamento mecânico porque:

- bom desempenho para altas capacidades de produção
- condições de trabalho são substancialmente melhores na área de projeção, comparado ao concreto projetado via seca e
- uma maior durabilidade devido a um teor de água bem controlado.

As vantagens do concreto projetado via úmida são vistas em muitas áreas diferentes das obras. Comparando o concreto projetado via úmida ao via seca, essas vantagens geralmente incluem:

- Maior capacidade nominal de projeção de até 30 m/h
- Menor reflexão
- Muito menos geração de poeira
- Custos reduzidos de desgaste dos equipamentos
- Baixa demanda de ar durante a projeção
- Alto desempenho e durabilidade do concreto projetado aplicado (teor de água constante)

No entanto, essas vantagens também apresentam limitações: o concreto projetado via úmida usado no processo de fluxo denso requer mais trabalho e preparações, especialmente no início (para inicialização) e no final (para limpeza). Além disso, o tempo de trabalhabilidade, até que o cimento inicie a pega, é algo predeterminado devido aos parâmetros de dosagem e o concreto projetado tem que ser aplicado dentro deste tempo. Após este tempo, qualquer mistura não projetada não pode mais ser usada.

5.1.1 DOSAGEM DO CONCRETO PROJETADO VIA ÚMIDA

A dosagem do concreto projetado via úmida depende dos requisitos especificados e da trabalhabilidade desejada, o que significa que se deve considerar o seguinte:

- Especificações do concreto projetado no estado endurecido (resistência à compressão, absorção de energia, durabilidade)
- Conceito logístico (transporte/métodos de manuseio/condições de temperatura)
- Condições especificadas do material instalado (desenvolvimento de resistência muito inicial (0-2h) e inicial (2-240))
- Economia da mistura de concreto projetado via úmida

Com base nesses aspectos, o tipo e consumo de cimento, o tipo e graduação dos agregados, a relação a/l, bem como o tipo e a quantidade de aditivos para concreto projetado são selecionados e confirmados por testes ou ajustados após avaliação provada dos parâmetros objetivos. Uma dosagem típica de uma mistura de concreto projetado via úmida é demonstrada adiante na Tabela 5.1.

No que diz respeito ao tamanho das partículas dos agregados, os agregados disponíveis localmente são geralmente o fator principal que determina a melhor escolha da curva granulométrica. A curva que melhor atenda aos requisitos especificados deve ser determinada por testes e ensaios com os materiais disponíveis reais (ver Seção 5.1.1.1).

Quanto ao desenvolvimento da dosagem da mistura para concreto projetado via úmida usado no processo de fluxo denso, a tarefa mais exigente provavelmente é alcançar uma boa bombeabilidade da mistura. A capacidade de bombeamento depende essencialmente de uma curva granulométrica adequada e de um volume e qualidade suficientes da pasta. Esses dois aspectos críticos, a curva granulométrica e a pasta, são discutidos mais detalhadamente abaixo (ver Seção 5.1.1.2).

Agregados e Água de amassamento

Agregados usados na produção de concreto podem ter efeitos diferentes sobre a água de dosagem, dependendo da natureza e fonte do agregado, bem como das condições ambientais. A interação dos agregados com a água de amassamento resulta do teor de água de uma possível porosidade dos agregados, bem como da água adicional sobre a superfície dos agregados úmidos. Ambos os efeitos devem ser considerados adequadamente na dosagem.

A porosidade capilar dos agregados conduz aos efeitos de adsorção de água. Se os poros estão saturados com água, esta água não deve ser considerada no cálculo da relação a/l. No caso de agregados parcialmente ou completamente secos, no entanto, parte da água de amassamento é imediatamente adsorvida por essa porosidade até que o agregado esteja saturado, a mistura perde trabalhabilidade e a água total de amassamento terá que conseqüentemente ser aumentada. Por outro lado, os agregados que estão muitas vezes úmidos e carregam água adicional em sua superfície, contribuem para a água total de amassamento, aumentando assim a relação a/l.

Três cenários extremos em relação à dosagem podem ser definidos em termos de agregados como ilustrados abaixo. O cálculo da dosagem é baseado na condição saturada superfície seca do agregado (SSS), de forma que a quantidade total de água introduzida pelos agregados usados (a umidade da superfície é variável) e sua água de absorção tem que ser conhecidas e consideradas.

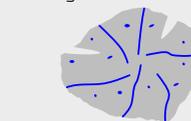


Sem água

Seco em estufa

Agregados completamente secos (superfície externa e poros capilares):

- Consistência do concreto será menos trabalhável que a almejada
- Concreto requer mais água que a então calculada a partir da relação a/l até que os poros sejam saturados com água.

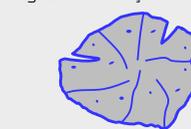


Água de Absorção

Saturado Superfície Seca (SSS)

Poros capilares estão saturados com água e a superfície externa seca:

- Consistência do concreto será a almejada
- Concreto requer só a água de amassamento calculada da relação a/l.



Água de Absorção/Umidade Superficial

Umidade superficial

Poros capilares saturados com água e umidade superficial livre:

- Consistência do concreto será mais fluida que a almejada
- Concreto requer menos água de amassamento que a calculada da relação a/l devido à água adicional sobre a superfície dos agregados.

Tabela 5.1: Exemplo de cálculo de dosagem de materiais para um metro cúbico de concreto projetado via úmida

| Componentes | | | Volume por 1 m ³ | | Massa por 1 m ³ | | Dosagem por 1 m ³ | |
|---|------------------------|-------------------|---------------------------------------|--------------|---|--|--|--|
| | Especificação Concreto | Massa Esp. [kg/l] | Total agregados | Duas frações | Umidade incluída na água de amassamento | | Considerando a umidade e água da solução | |
| Cimento 400 kg/m ³ | 400 kg/m ³ | 3.15 | 127 L | | 400 kg | | 400 kg | |
| Sika® ViscoCrete® SC 1% massa de cim. ¹⁾ (25% teor de sólidos) | 4 kg/m ³ | 1.05 | 1 L | | 1 kg | | 4 kg | |
| Água total a/l = 0.48 | 192 kg/m ³ | 1.0 | 192 L | | 192 kg | | 133 kg | |
| Água de amassamento Água total reduzida pela umidade | | 1.0 | | | | | | |
| Ar 4% (planejado) | 4% | | 40 L | | | | | |
| | | | Agregados saturados superfícies secas | | Agregados saturados superfícies secas | | Agregados úmidos | |
| | | | 640 L | | | | | |
| | | | 58% | 371 L | 995 kg | | 1036 kg | |
| | | | 42% | 269 L | 720 kg | | 735 kg | |
| | | | 1000 L | | 2308 kg | | 2308 kg | |
| Total de agregados (miúdo + graúdo) | | | Preencher para 1 m ³ | | 2.68 | | | |
| 0 - 4 mm 4% umidade | | | | | 2.68 | | | |
| 4-8 mm 2% umidade | | | | | 2.68 | | | |

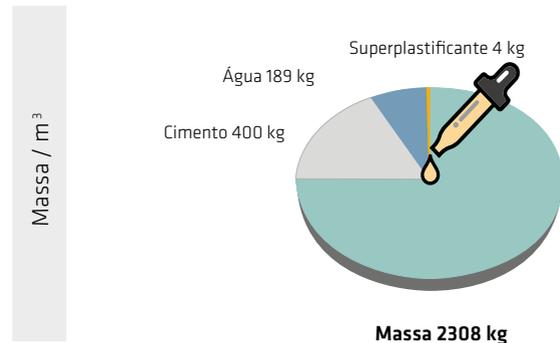
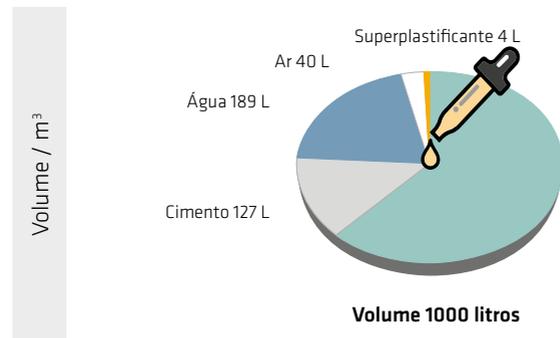
¹⁾ Se a quantidade total de aditivos excede 3 L/m³, seu teor de água tem que ser considerado para a relação a/l (EN206).
Nota: É comum associar alternativamente os aditivos de dosagem relativamente baixa de 1:1 para a água de amassamento

Fluxo de cálculo →

Legenda de Cores:

- Base de cálculo
- Materiais incluindo umidade/água de solução
- Qualquer água/umidade é considerada com a água de amassamento

Mistura base de concreto projetado 2308 kg/m³



Agregados 640 L

PROCESSO DE PROJEÇÃO

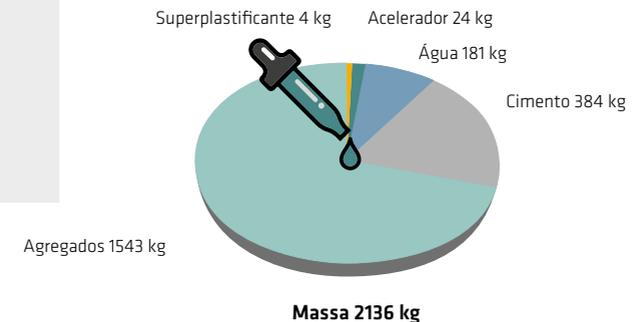
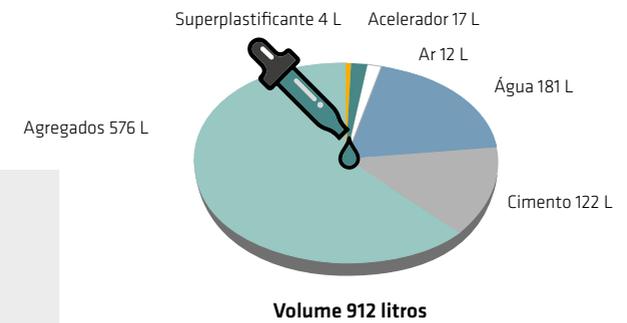
Variações Aproximadas:

- 1) Adição acelerador 6% massa de cim. + 24 kg + 17 L
- 2) Poeira & Reflexão Agregados 10% - 172 kg - 64 L
Cimento - 4% - 16 kg - 5 L
Água/umidade - 4% - 8 kg - 8 L
- 3) Compactação sobre o substrato - 3% of 940 L - 28 L

Variações Totais (aprox.) - 172 kg - 88 L

Agregados 1715kg

Concreto projetado aplicado 2343 kg/m³



Agregados 1543 kg

Fig. 5.2: Balanço aproximado de materiais de concreto projetado via úmida, antes (esquerda) e após o processo de projeção (direita)

5.1.1.1 GRADUAÇÃO DOS AGREGADOS

Os agregados são, de longe, a maior fração do concreto projetado. É a parte mais econômica de preenchimento de espaço do volume de concreto, que também atua como uma espécie de matriz do concreto projetado.

A distribuição granulométrica dos agregados deve sempre ser otimizada de maneira a atingir:

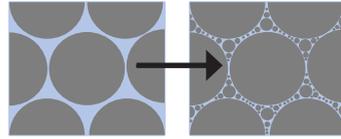


Fig 53: Preenchimento de espaço de porosidade do esqueleto também minimiza monodispersas / esquerda) e uma mistura dispersa (direita)

- Preenchimento máximo de espaço para uma alta contribuição mecânica para a resistência à compressão. Uma baixa porosidade do esqueleto também minimiza a quantidade de pasta de cimento requerida para preenchimento
- Área superficial total minimizada dos agregados, para atingir boa bombeabilidade com um volume de pasta mínimo.
- Distribuição de tamanho de partículas bem balanceada para garantir uma mistura estável e homogênea que não segrega, mesmo sob mudanças elevadas de pressões durante o bombeamento.

A base de todas as curvas granulométricas atuais para concreto, por exemplo, conforme a DIN 1045-2, é a chamada Curva Fuller, que foi empiricamente desenvolvida no início do século XIX pelos engenheiros americanos William B. Fuller e Sanford E. Thompson. Com uma graduação de acordo com a Curva de Fuller, é pretendido alcançar uma densidade ótima de empacotamento das partículas sob as condições práticas de dosagem do concreto. No entanto, isso depende do tamanho máximo do agregado e da forma da partícula (perfeitamente esférica, arredondada ou britada). A descrição matemática da curva de Fuller, como originalmente definido por Fuller e Thompson, incluía todos os tamanhos de partículas, até mesmo do cimento, enquanto as curvas granulométricas modernas para concreto não consideram o cimento.

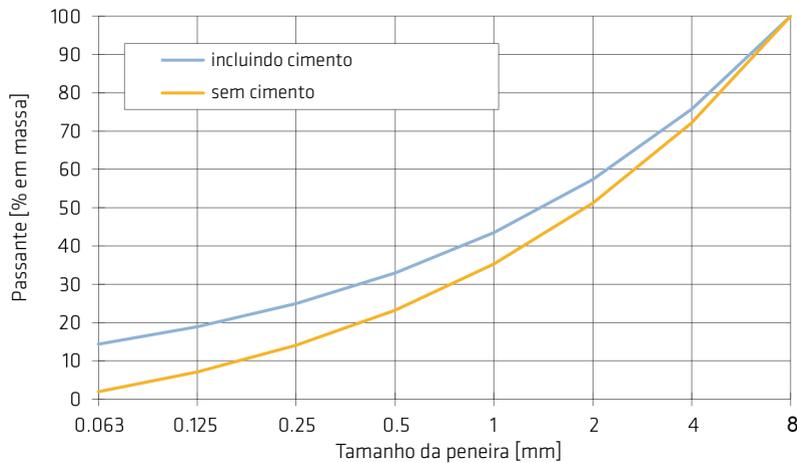


Fig. 5.4: Curvas de Fuller para uma mistura de agregados naturais de 0-8 mm, com e sem cimento

A forma das partículas tem um efeito sobre as demandas relativas à fração fina da distribuição granulométrica das partículas. A partir de um agregado idealizado como esferas perfeitas, a demanda por finos aumenta com o aumento da irregularidade. Isso pode ser explicado muito bem pela maior necessidade de pasta, que é necessária para garantir a lubrificação da mistura no bombeamento.

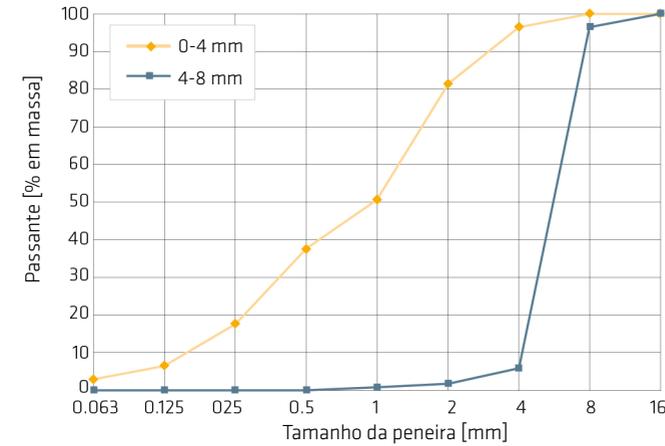


Fig. 5.5: Curva granulométrica das frações individuais de agregados

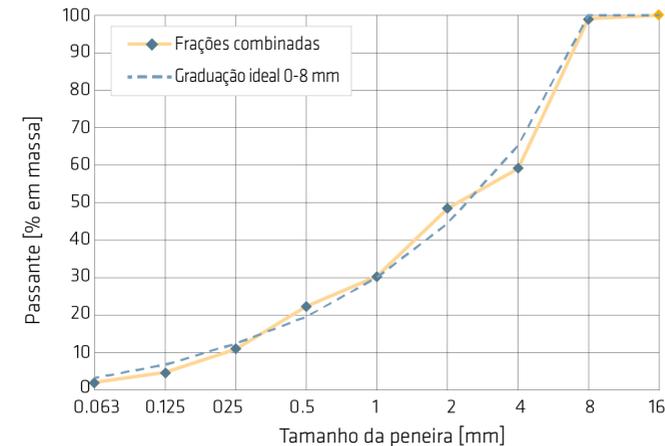


Fig. 5.6: Curva de graduação da dosagem final

Tabela 5.6: Example of a shotcrete grading curve from two sand fractions

| Proporção | Fração | Abertura de peneira [mm] | | | | | | | | |
|-----------|--------------------|--------------------------|----------|---------|--------|------|------|------|-------|-------|
| | | 0,063 mm | 0,125 mm | 0,25 mm | 0,5 mm | 1 mm | 2 mm | 4 mm | 8 mm | 16 mm |
| 58 % | 0-4 mm | 3% | 7% | 18 % | 38 % | 48 % | 82 % | 97% | 100 % | 100 % |
| 42 % | 4-8 mm | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % | 1 % | 2 % | 6 % | 97% | 100 % |
| | Frações Combinadas | 2 % | 4 % | 11 % | 22 % | 30 % | 48 % | 59 % | 99 % | 100 % |

Na Figura 5.5 e Tabela 5.6 é retratado um exemplo de curva granulométrica, adequada para areia natural e agregado. Na literatura, muitas vezes há limites superiores e inferiores que são dados como uma diretriz para uma curva granulométrica adequada. No entanto, é preciso sempre considerar a situação individual e as limitações mais importantes em relação à curva granulométrica que são:

- Forma do Agregado -> agregados britados requerem mais finos que seixos naturais
- Bombeabilidade -> regra de ouro: Ao menos 500 kg/m³ de finos são requeridos para agregados arredondados de 0-8 mm
- > uma curva granulométrica contínua é imprescindível

Regra de ouro: Para um razoável balanço das frações de agregados, uma distribuição adequada do tamanho de partículas para concreto projetado de 0-8 mm é tipicamente alcançada misturando 60 % das frações de areia (0-4 mm) com 40 % da fração graúda (4-8 mm).

5.1.12 FINOS E PASTA

Quando o concreto projetado via úmida é aplicado pelo processo de fluxo denso, a bombeabilidade da mistura de concreto é fator mais decisivo. Deve-se considerar nesse sentido, que a bombeabilidade é uma característica concreta que é afetada por várias propriedades da mistura. Em particular, a bombeabilidade é afetada pela reologia da mistura (viscosidade, tixotropia, pseudoplasticidade), sua coesão e a lubrificação dos agregados e das superfícies internas das linhas de tubulação.

Além da curva granulométrica dos agregados, todas essas propriedades citadas são altamente afetadas pela pasta da mistura: tanto sua quantidade como sua qualidade.

A pasta é composta por todas os finos da mistura, mais a água e, até certo ponto, é ar incorporado na mistura. O teor de finos de um concreto projetado abrange a parte dos componentes da mistura com tamanho de partícula menor ou igual a 0,125 mm, que são, portanto:

- Cimento
- Agregados abaixo de 0,125 mm
- Adições minerais para concreto

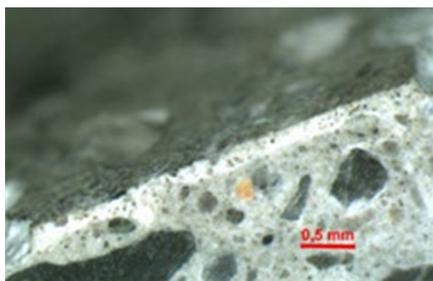


Fig. 5.7: Seção transversal de concreto projetado bombeado e endurecido na tubulação: a camada clara de pasta é claramente visível na periferia

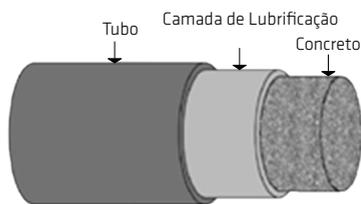


Fig. 5.8: Esboço simplificado do fluxo de concreto projetado bombeável conforme Kaplan et. al.¹

(1) D. Kaplan, F.Larrad and T.Sedran, ACI Materials Journal, vol. 102, no. 2, pp. 110-117, 2005

O impacto da pasta na bombeabilidade abrange vários aspectos:

■ Lubrificação das linhas

Em uma tubulação linear, a bombeabilidade pode ser essencialmente descrita pelas propriedades de uma camada circundante entre as paredes do tubo e a mistura real de concreto: O concreto é considerado neste caso como um plugue estático que se move através do tubo, cisalhamento ocorre na primeira aproximação (a baixas taxas de fluxo) apenas próximo ou nessa camada circundante. Aqui uma camada muito fina de pasta também atua como lubrificante controlando a tensão de cisalhamento (Fig. 5.8). A maior parte do concreto bombeado é, portanto, transportada através do tubo como um plugue, com uma zona de cisalhamento externa mais ou menos espessa, a qual também depende da velocidade de bombeamento.

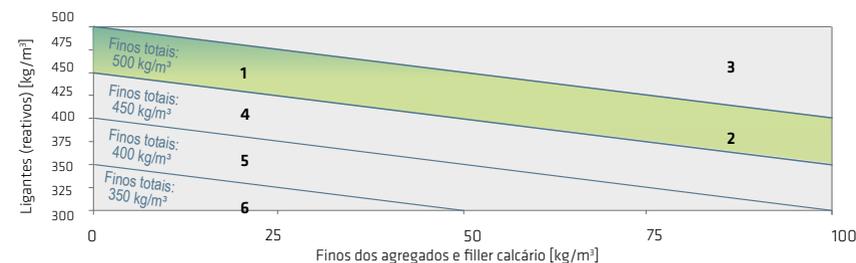
■ Lubrificação interna dos agregados na mistura

Na realidade, é concreto bombeado, em seu caminho da bomba até o bico de projeção, muitas vezes tem que passar por reduções, muitas voltas e curvas, onde a lubrificação interna do concreto se torna ainda mais importante. O concreto tem que exibir um comportamento hidráulico, que significa que as partículas de agregados têm que se mover facilmente umas com as outras, o que é alcançado graças à camada lubrificante de pasta.

■ Coesão da mistura

O concreto tem que suportar condições bastante severas durante o bombeamento, especialmente sob altas pressões alternantes. Os agregados e finos devem permanecer juntos, qualquer separação dos finos pode levar a "buchas" de agregados graúdos e um bloqueio imediato. Além de ter uma distribuição granulométrica contínua dos agregados, a qualidade da pasta é importante para manter a mistura homogênea.

Todos esses aspectos requerem um volume de pasta suficientemente superior ao volume necessário para preencher apenas o espaço do esqueleto de agregados. A reologia de um concreto usinado muda dependendo do volume da pasta, bem como da qualidade da pasta, isto é, seu teor de água, o tipo e o uso de plastificantes, e a mineralogia dos finos. No entanto, há sempre um valor limiar individual para o volume da pasta, que limita a bombeabilidade do concreto e abaixo do qual nenhum dos parâmetros supracitados da qualidade da pasta podem causar uma alteração.



- 1 Teor ótimo de finos: boa trabalhabilidade, coesão, aderência e resistência inicial
- 2 Similar a (1) mas com baixo consumo de cimento: risco de falha na performance do concreto projetado (Garantir boa relação a/l, dosagem e dose de acelerador)
- 3 Alto teor de finos: concreto viscoso, má mistura do acelerador e concreto
- 4 Baixo teor de finos: baixa lubrificação, má trabalhabilidade e bombeabilidade
- 5 Risco de sedimentação, exsudação e entupimentos/bloqueios de tubulação

Fig. 5.9: Influência do teor de finos sobre a dosagem de concreto projetado (agregados 0-8 mm)

Em uma mistura típica de agregados 0-8 mm para concreto projetado o volume de pasta requerido deve estar no intervalo de 330 L/m³ até 380 L/m³. Abaixo deste intervalo podem ocorrer problemas com o bombeamento. No entanto, o volume exato de pasta requerido depende em particular da forma dos agregados. Considerando que o limite inferior do volume de pasta funcionaria para bombear uma mistura usando agregados arredondados, a demanda mínima de pasta aumentaria em 10 - 20 L/m³ com agregados britados.

Para avaliar uma determinada dosagem, como regra de ouro, uma mistura de concreto projetado bombeável, exibindo graduação razoável de agregados 0-8 mm (arredondados) e um a/c = 0,47, por exemplo, deve compreender uma quantidade total de finos de cerca de 500 kg. Por exemplo, quando os agregados introduzem cerca de 100 kg/m³ de finos, 400 kg/m³ de cimento são necessários para obter um total de 500 kg/m³ de finos na mistura. Espera-se que essa quantidade produza um volume de pasta estável (sem exsudação) de cerca de 350 L/m³. Este volume de pasta é suficiente para lubrificar as partículas de agregados da mistura. Todos os espaços do esqueleto de agregados são inteiramente preenchidos e há pasta suficiente disponível para formar uma camada cobrindo todas as partículas e as superfícies dos tubos do equipamento.

Consequentemente uma dada dosagem tem que ser bem ajustada com respeito aos finos que são introduzidos pelos agregados, pelo consumo de cimento e qualquer adição mineral. As propriedades da mistura são influenciadas pelo teor de finos/volume de pasta dependendo se é:

■ *baixo:*

A mistura exibirá baixa capacidade de bombeamento devido à lubrificação insuficientemente baixa. Como é provável que a parte sólida faltante da pasta seja compensada pela água, há um alto risco de segregação e exsudação causando bloqueios, e a resistência à compressão aos 28d do concreto projetado será reduzida devido à falta de pasta cimentícia (“cola”) nos espaços entre as partículas de agregados.

■ *correto:*

A mistura exibirá uma estrutura ideal, razoável retenção de água e boa trabalhabilidade. Os agregados são bem lubrificados para uma boa bombeabilidade. A resistência à compressão aos 28d é ótima (com respeito à contribuição da pasta) uma vez que a matriz de agregados é inteiramente preenchida e interconectada pelo efeito aglutinante do cimento.

■ *alto:*

A mistura é bastante viscosa e difícil de projetar, por exemplo, a mistura não homogênea do acelerador pode ocorrer. Como a pasta é a parte do concreto que traz variações de volume devido aos processos de hidratação, um excesso no volume de pasta pode causar maior fluência e retração.

Além do volume de pasta, é sempre preciso considerar a qualidade da pasta. Ao lado da graduação balanceada dos agregados, é a qualidade da pasta que afeta fortemente a bombeabilidade do concreto projetado por meio de sua coesão: mesmo uma curva granulométrica perfeita dos agregados não é suficiente para garantir uma mistura coesa e de boa bombeabilidade, se a qualidade da pasta for inadequada, por exemplo, se houver:

- muita água e/ou superplastificante (baixa viscosidade)
- um teor inapropriadamente elevado de adições (reologia é muito pegajosa)

Em alguns casos, ar adicional pode ser introduzido na mistura para melhorar a qualidade da pasta e isso também afeta positivamente a bombeabilidade e a capacidade de projeção da mistura, no entanto, isso nunca pode compensar o volume insuficiente de pasta.

5.1.1.3 ÁGUA DE AMASSAMENTO

A água total de amassamento, a qual compreende a água adicionada e a água da umidade dos agregados e dos aditivos, influencia as propriedades da mistura no estado fresco (plasticidade) e, em combinação com as reações químicas durante a aceleração e hidratação do cimento, as propriedades finais do concreto projetado (ex.: durabilidade).

O teor de água do concreto é expresso como relação água/cimento (a/c) ou como relação água/ligante (a/l). Como regra básica para a relação a/c, se aplica o seguinte para concreto projetado para escavações seguras (resistência classe J2):

- a/c < 0,50 como requisito mínimo para concreto projetado
- a/c < 0,46 como intervalo preferencial para concreto projetado

Há de ser considerado que o teor absoluto de água requerido por uma mistura para atingir uma certa fluidez, difere dependendo da composição dos ligantes. Em comparação com o cimento e entre si, o comportamento individual de adições com relação à demanda de água difere devido a seus tamanhos de partículas e propriedades químicas.

Devido às reações químicas que ocorrem no concreto projetado, parte da água de amassamento é quimicamente “consumida” nas fases hidratadas sólidas recém formadas. Assumindo uma dosagem típica de 6% de acelerador AF sobre a massa de cimento, o consumo de água em relação à massa de cimento para os diferentes processos químicos, aceleração e hidratação do cimento, é aproximadamente:

- 2 % ligada quimicamente em etringita a partir da reação de aceleração
- 25 % ligada quimicamente em hidratos do cimento
- 15 % ligada fisicamente aos hidratos do cimento (água de gel)

Assim, qualquer água adicionada à mistura de concreto projetado via úmida além do a/c = 0,42 pode ser tida como excesso de água que posteriormente levará a poros capilares na matriz cimentícia. O teor total de água de uma mistura de concreto consiste na água de amassamento total e parte da umidade intrínseca adsorvida nos agregados utilizados. Como em qualquer concreto, a quantidade de água na mistura afeta consideravelmente todas as propriedades do concreto projetado endurecido e é geralmente o fator dominante para sua durabilidade: quanto menor a relação a/c, melhor a durabilidade do revestimento de concreto projetado.

Medidas para melhoria de propriedades específicas de misturas de concreto projetado via úmida

As quantidades individuais citadas não tem a intenção de estabelecer regras e fornecer instruções específicas de dosagem, mas de servir como um guia orientativo.

| Dosagem (exemplo, conforme a Tabela 5.1) | | |
|--|-----------------------------|--------------|
| Ingredientes | Tipo | Valor |
| Cimento | OPC/CEM I (Similar ao CP I) | 400 kg |
| Agregados | 0 - 8 mm | 1771 kg |
| Água | Conforme as especificações | 192 kg |
| Superplastificante | Sika® ViscoCrete® SC | 1 % |
| Teor de Finos | Cimento e finos ≤ 0,125 mm | 450 - 500 kg |
| Acelerador | Sigunit® AF | 5-8 % |

| Parâmetros recomendados para concreto projetado | |
|---|--------------|
| Flow table (espalhamento) | 450 - 650 mm |
| Temperatura | 20 °C |
| Relação a/c | ≤ 0,48 |
| Teor de Ar | 3 - 5 % |
| Tempo de trabalhabilidade | 2-3 h |
| Desempenho Concreto Projetado | J2 |

| Maior resistência inicial | | |
|----------------------------|----------------------|--|
| Mudança na dosagem | Produto | Efeito |
| + 2 % Acelerador | Sigunit® (AF) | Maior desenvolvimento de resistências iniciais |
| + 0,2 % Superplastificante | Sika® ViscoCrete® SC | Redução de água, melhor fluidez da mistura |
| - 10 a - 15 kg de água | Água | Maiores resistências iniciais |

| Maior resistência à compressão final | | |
|--------------------------------------|----------------------|---|
| Mudança na dosagem | Produto | Efeito |
| + 20 kg Sílica ativa | SikaFume® | Aumento da densidade |
| + 0,2 % Superplastificante | Sika® ViscoCrete® SC | Redução de água |
| - 10 a - 15 kg água | Água | Maior resistência à compressão strength |

| Maior tempo de trabalhabilidade | | |
|---------------------------------|-----------|-------------------------------------|
| Mudança na dosagem | Produto | Efeito |
| + 0,3 % Retardador | SikaTard® | Retardo/estabilização da hidratação |

| Melhor bombeabilidade | | |
|-------------------------------|--|---------------------------|
| Mudança na dosagem | Produto | Efeito |
| + 30 kg Finos | Areia Fina/Filler calcário/Cinza volante/Cimento | Lubrificação |
| + 0,5 % Agente de bombeamento | Sika® Stabilizer Pump | Pressão de bomba reduzida |
| + 0,2 % Superplastificante | Sika® ViscoCrete® SC | Melhor trabalhabilidade |

| Maior durabilidade I | | |
|----------------------------|----------------------|--|
| Mudança na dosagem | Produto | Efeito |
| - 15 kg Água | Água | Aumento da densidade |
| + 0,2 % Superplastificante | Sika® ViscoCrete® SC | Redução de água, melhor trabalhabilidade |

| Maior durabilidade II | | |
|----------------------------|----------------------|--|
| Mudança na dosagem | Produto | Efeito |
| + 30 kg Sílica ativa | SikaFume® | Aumento da densidade |
| + 0,2 % Superplastificante | Sika® ViscoCrete® SC | Redução de água, melhor trabalhabilidade |

| Aumento de ductilidade I | | |
|--------------------------------|----------------------|---------------------------|
| Mudança na dosagem | Produto | Efeito |
| + 20-40 kg Macro fibras de aço | SikaFiber® | Maior absorção de energia |
| + 0,2 % Superplastificante | Sika® ViscoCrete® SC | Melhor trabalhabilidade |

| Aumento de ductilidade II | | |
|-----------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| Mudança na dosagem | Produto | Efeito |
| + 8-10 kg Macro fibras sintéticas | SikaFiber® Force | Maior absorção de energia |
| + 0,2 % Superplastificante | Sika® ViscoCrete® SC | Melhor trabalhabilidade workability |

| Melhoria da resistência ao fogo | | |
|---------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| Mudança na dosagem | Produto | Efeito |
| + 2 kg Micro fibras sintéticas | SikaFiber® | Redução da pressão de vapor |
| + 0,2 % Superplastificante | Sika® ViscoCrete® SC | Melhor trabalhabilidade |

| Melhoria da sustentabilidade I | | |
|--------------------------------|--|--|
| Mudança na dosagem | Produto | Efeito |
| - 70 kg Cimento | CEM I (similar ao CP I) | Maior durabilidade, pegada reduzida de CO ₂ |
| + 70 kg Adições | Ex.: filler calcário/cinza volante/escória | Substituição |

| Melhoria da sustentabilidade II | | |
|---------------------------------|--------------------------------|--|
| Mudança na dosagem | Produto | Efeito |
| - 400 kg Cimento | CEM I (similar ao CP I) | Maior durabilidade, pegada reduzida de CO ₂ |
| + 400 kg Cimento composto | CEM II/CEM III (~CP II/CP III) | Substituição |

5.2. CONCRETO PROJETADO VIA SECA

O processo de concreto projetado via seca consiste na entrega (transporte) de uma mistura de concreto seco e pronto, composto por agregados, cimento e quaisquer aditivos para concreto projetado, mas sem a água de amassamento. Esta formulação pronta é completamente seca (seca ao forno) ou é umedecida apenas pela umidade inerente dos agregados. Para a operação de projeção, o concreto projetado seco é misturado no bico de projeção com a água e acelerador de pega para concreto projetado e, em seguida, imediatamente aplicado. Em vez de aceleradores para concreto projetado, cimentos especiais de endurecimento rápido que dão pega em um tempo muito curto depois do contato com água também podem ser usados como uma alternativa no processo de projeção via seca. O processo de fluxo aerado deve ser utilizado na aplicação de concreto projetado via seca. O concreto projetado via seca foi o primeiro desenvolvido e é um processo que há muito se mostrou bem sucedido e tem sido continuamente desenvolvido e melhorado.

O concreto projetado via seca é usado quando se requerem menores volumes e rendimentos de projeção, e quando resistência muito inicial elevada é essencial, por exemplo, para selamento preliminar contra alta penetração de água com gunites. Aplicações típicas para concreto projetado via seca e gunites pré-misturados são:

- Trabalhos de reparo de concreto
- Selagem preliminar de superfície contra o ingresso de água ou lixiviação
- Obras de concreto projetado de pequeno a médio porte
- Obras de impermeabilização
- Quando o conceito logístico não é dependente do tempo (armazenamento local disponível)

As vantagens do concreto projetado via seca residem em sua flexibilidade:

- Resistência muito inicial alta para selamento preliminar de superfície ou estabilização
- Prazo de validade quase ilimitado (disponibilidade local) do material estocado em silo
- Nenhuma sobra de concreto pré-misturado como resíduo

Com concreto projetado via seca, no entanto, a economia é fortemente afetada pelas altas taxas de reflexão e geração de poeira e pelos maiores custos de desgaste dos equipamentos.

5.2.1 DOSAGEM DO CONCRETO PROJETADO VIA SECA

A dosagem do concreto projetado via seca novamente depende dos requisitos específicos. No entanto, além dos requisitos de resistência inicial, a adaptação para minimizar a geração de poeira e as quantidades de reflexão é essencial para o uso econômico do concreto projetado via seca. É como resultado desses parâmetros que o tipo e o consumo de cimento, o tipo e a graduação dos agregados, o teor de água (umidade inerente) e o tipo e quantidade dos aditivos para concreto projetado são selecionados.

Em relação à graduação dos agregados, aqueles disponíveis localmente são novamente o principal fator determinante para a escolha da curva granulométrica. A curva que melhor atender aos requisitos especificados deve ser estabelecida por meio de testes e experiência de ensaios com o material granular disponível. Em concreto projetado via seca, muitas vezes são utilizadas misturas prontas secas ao forno, que são fornecidas em sacos, bags ou por silo e, portanto, devem ser armazenadas localmente antes do uso. Desta forma e onde há espaço adequado disponível localmente, a obra independe do agregado obtido localmente.

Misturas de concreto projetado via seca à base de materiais secos ao forno são altamente especiais, produtos pré-misturados em fábrica, que também podem fazer uso de tipos especiais de cimento que não poderiam ser usados para concretos projetados via úmida ou semi úmida, pois a presença da umidade resultaria em bloqueios (entupimentos) no sistema pneumático de alimentação seco, ou mesmo destruir as características potenciais de aplicação do produto e o desempenho de propriedades, devido à pré-hidratação do cimento antes de seu uso.

5.2.2 CONCRETO PROJETADO VIA SEMI ÚMIDA

Além dos produtos secos ao forno, misturas de concreto projetado via semi úmida podem muitas vezes ser um material tecnicamente e economicamente interessante para fluxo aerado, aplicação de projeção seca. Todos os ingredientes a granel são materiais padrões disponíveis em usinas comuns de concreto, o teor de umidade inerente dos agregados deve ser entre 2% e 5% e este é controlado mediante a umidade normal do material granular ou é obtido adicionalmente por meio de instalações especiais de molhagem. O teor de umidade é muito importante para uma geração controlada de poeira e uma entrega eficiente. Estas misturas de concreto projetado via semi úmida produzidas localmente em uma usina de concreto sempre têm alguma umidade intrínseca, porque os agregados só podem ser mantidos secos com um grande esforço e instalações adaptadas de alto custo. Portanto, um aditivo retardador é preferencialmente adicionado durante o processo de preparação para evitar a pré-hidratação precoce do cimento. Conseqüentemente, ao projetar misturas semi úmidas, deve-se adicionar um acelerador para compensar o efeito retardante e também para alcance do enrijecimento e endurecimento necessários ao concreto projetado.

6 DEFINIÇÃO DE CONCRETO PROJETADO POR PROCESSO

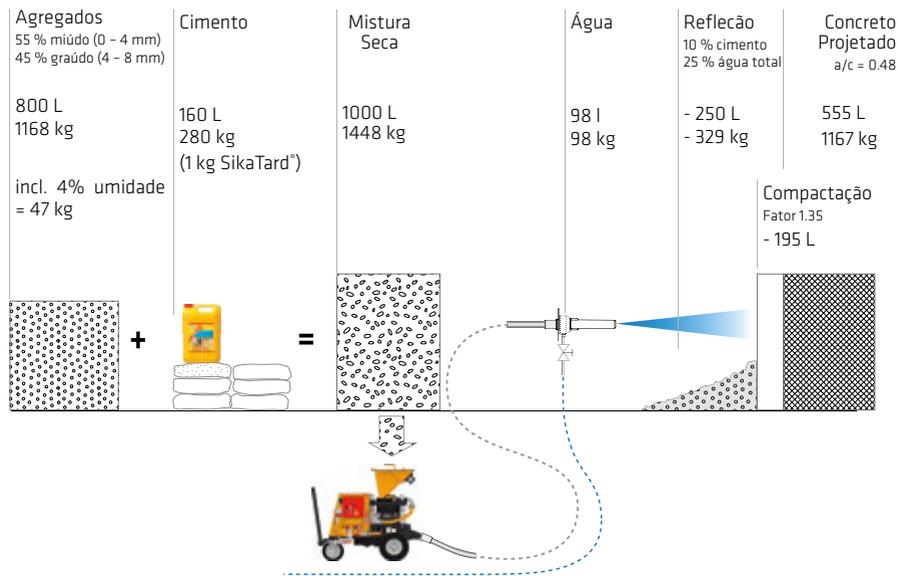


Fig. 5.10: Balanço aproximado de material de um concreto projetado via seca com uma relação a/c assumida de 0,46
Nota: O volume total da mistura seca de concreto é maior que o de agregados, já que uma camada de cimento se adere às partículas terra úmidas (semi úmidas).

O processo de projeção é definido pelo processo de alimentação do concreto ou argamassa projetada a partir do veículo de entrega até o bico de projeção e pela projeção do material. Existem dois sistemas básicos usados para concreto projetado:

- **Processo de fluxo denso**
A mistura é transmitida ao bico de projeção por bombeamento. Portanto, apenas um concreto previamente pronto e bombeável (concreto projetado via úmida) é adequado para uso em um processo de projeção de fluxo denso. No bico de projeção o material é misturado com o acelerador com a ajuda de ar comprimido o qual também dispersa, projeta e compacta o concreto projetado sobre o substrato.
- **Processo de fluxo aerado**
A mistura é transmitida pneumáticamente para o bico de projeção onde é misturada com água e, dependendo do tipo de concreto projetado, às vezes com um acelerador de pega para concreto projetado. Os tipos de equipamentos mais recentemente desenvolvidos utilizados para esta tecnologia de concreto projetado são máquinas a rotor e unidades de silos à pressão, que permitem um fluxo muito constante de concreto projetado. Esta tecnologia de equipamento para concreto projetado, também pode ser usada para qualquer outro tipo de concreto projetado, até mesmo concreto projetado via úmida (por exemplo, usando uma máquina a rotor Aliva apropriada).

$$\text{Consumo de cimento no concreto projetado aplicado} = \frac{\text{Teor de cimento} - \text{perda de cimento}^{(1)}}{\text{Volume de concreto projetado aplicado}}$$

$$\frac{0,9 \times 280 \text{ kg/m}^3 \times 1000 \text{ L}}{555 \text{ L}} = 454 \text{ kg/m}^3$$

⁽¹⁾ 25 % reflexão = 10 % cimento

Fig. 5.11: Consumo de cimento no concreto projetado via seca aplicado

Tabela 6.1: Processo de fluxo denso e aerado com diferentes materiais para concreto projetado

| Processo | Princípio de alimentação | Equipamento | Material Concreto Projetado | Adições no bico |
|--------------|--------------------------|-----------------|----------------------------------|-------------------|
| Fluxo aerado | Pneumático (ar) | Máquina a Rotor | Cunite, seco ao forno (ensacado) | Água |
| | | | Mistura seca, semi-úmida | Água + Acelerador |
| | | | Concreto projetado via úmida | Ar + Acelerador |
| Fluxo Denso | Hidráulico | Bomba de Pistão | Concreto projetado via úmida | Ar + Acelerador |

Tabela 6.2: Campos de aplicação dos vários processos

| Equipamento/ Materiais | Fluxo aerado | | | Fluxo denso |
|--|-------------------------------|---------------------------|------------------|------------------|
| | Rotor/argamassa pré-misturada | Rotor/concreto semi úmido | Rotor/concreto | Bomba/concreto |
| Requisitos de entrega | | | | |
| Distância de entrega > 200 m | x | | | x ⁽¹⁾ |
| Distância de entrega 40 - 200 m | x | x | | x ⁽¹⁾ |
| Distância de entrega < 40 m | x | x | x | x |
| Rendimento de projeção > 10 m ³ /h | | | x | x |
| Rendimento de projeção 3 -10 m ³ /h | x | x | x | x |
| Rendimento de projeção < 3 m ³ /h | x | x | | |
| Altura da entrega > 100 m | x | | | x ⁽¹⁾ |
| Altura da entrega 20 -100 m | x | x | | x ⁽¹⁾ |
| Altura da entrega < 20 m | x | x | x | x |
| Condições do local | | | | |
| Menos espaço/estrito | x | x | x | |
| Operações com muitas interrupções | x | x | x ⁽²⁾ | x ⁽²⁾ |
| Necessidade de desempenho de resistência extremamente alto (infiltração de água/baixas temperaturas/...) | x | | | |
| Tipo de aplicação | | | | |
| Túneis e grandes minas | | | | x |
| Estabilização de taludes | | | x | x |
| Estabilização de valas | | x | x | x |
| Reabilitação | x | x | | |
| Obras de Arte | x | x | | |
| Selamento | x | | | |

x = adequado

⁽¹⁾ = alta quantidade de resíduo

⁽²⁾ =concreto retardado

6.1 PROCESSO DE FLUXO DENSO

Quando quantidades substancialmente altas de concreto projetado devem ser aplicadas, por exemplo, para a estabilização da escavação em túneis e mineração, o processo de fluxo denso é geralmente a primeira opção, o processo de fluxo denso consiste em três etapas:

- Entrega de um caminhão de concreto previamente pronto/misturado
- Transporte do concreto denso através da tubulação do braço ao bico de projeção (bomba de concreto)
- Projeção de concreto com ar comprimido e a adição de um acelerador (bico com anel conversor e ponteira de projeção)

A mistura para este processo, é basicamente um concreto previamente pronto que é bombeado através de tubulações em um fluxo denso para o bico de projeção, o fluxo denso de concreto diverge no anel conversor do bico de projeção por ar comprimido, misturado ao mesmo tempo com o acelerador, e imediatamente projetado sobre o substrato. A ponta do bico de projeção dá a forma ao fluxo aerado da mistura de concreto e acelerador em um jato de projeção uniforme.

Além do equipamento de projeção e a adição do acelerador ao bico de projeção, a principal diferença entre o concreto projetado fluxo denso e o concreto bombeado convencional está na exigência de que a pulsação no fluxo seja a mais baixa e consistente possível durante a alimentação do material, a fim de obter uma camada homogênea de concreto projetado. Para conseguir isso, várias medidas são tomadas para melhorar a taxa de alimentação e reduzir interrupções.

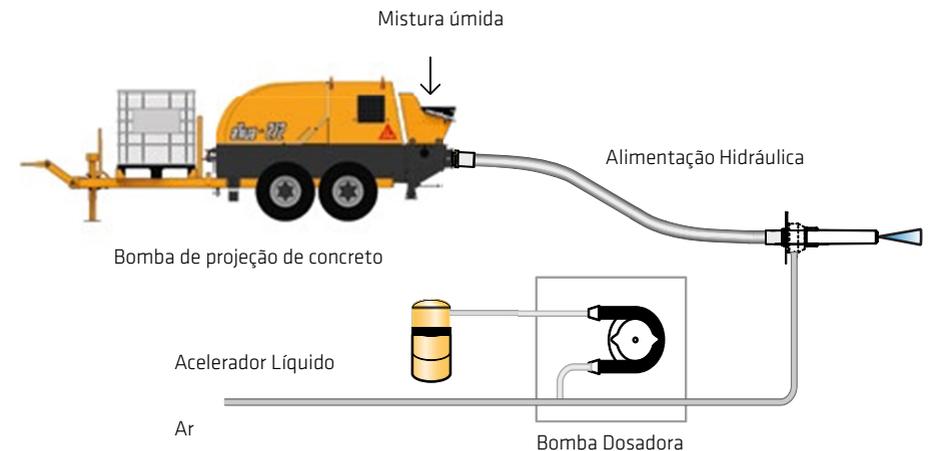


Fig. 6.1: Processo fluxo denso (via úmida)

6.1.1 VANTAGENS

A projeção via fluxo denso é o método mais moderno e eficiente de aplicação de concreto projetado quando comparado com o fluxo aerado, com vantagens que incluem:

- Maior rendimento e capacidade de projeção, até aprox. 30 m³/h
- Custos reduzidos de desgaste dos equipamentos de projeção
- Demanda de volume de ar comprimido muito menor
- Controle de qualidade otimizado do concreto projetado

Este processo de aplicação, no entanto, limita-se a ser usado apenas para concreto projetado via úmida, com suas altas demandas em relação a dosagem do concreto projetado e a capacidade de bombeamento.

6.1.2 EQUIPAMENTOS PARA O PROCESSO DE FLUXO DENSO

Métodos manuais e de aplicação mecânica podem ser usados para o processo de projeção via úmida, mas o concreto projetado é mais aplicado preferencialmente por máquina. As elevadas demandas de projeção e grandes seções transversais em muitos túneis também exigem que o trabalho seja mecanizado.

Os sistemas de equipamentos de projeção de concreto via fluxo denso usam principalmente bombas de pistão duplo para misturas de concreto projetado via úmida. Ao contrário das bombas de concreto convencionais, as bombas utilizadas para concreto projetado têm que atender à exigência adicional de entregar um fluxo de concreto o mais constante possível, para garantir a aplicação homogênea da projeção. Estes sistemas de projeção estão disponíveis em diferentes tamanhos, desde bombas menores com unidades de ar comprimido que são combinadas com sistemas separados de bico de projeção e de dosagem do acelerador, até sistemas de projeção completos muito maiores com bomba integral, dosagem do acelerador, fornecimento de ar comprimido e um braço de projeção robótico com o mangote e bico de projeção. O operador controla todo o processo de projeção de um local seguro por controle remoto.

Princípio de funcionamento de uma bomba de duplo pistão

As bombas de duplo pistão para concreto projetado são operadas hidráulicamente e alimentadas por motores elétricos ou à diesel. Elas consistem num cocho o qual é alimentado com a mistura de concreto entregue e a bomba de pistão duplo é conectada a ele e uma válvula 5 através da qual o concreto é bombeado alternadamente por ambos os cilindros para a linha de tubulação. Os dois pistões são conectados hidráulicamente e operam em um arranjo empurra e puxa.

O pistão para trás gera uma pressão negativa e é preenchido com concreto a partir do cocho. Ao mesmo tempo, o pistão dianteiro pressiona o concreto para dentro da linha de tubulação via válvula 5. No fim de cada golpe, os dois pistões são invertidos, a válvula 5 gira do último cilindro de bombeamento para o previamente preenchido, agora o cilindro ejetante e este concreto agora alimenta a linha.

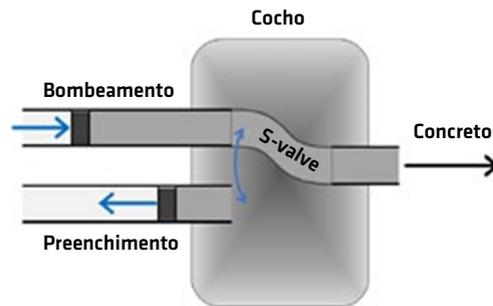


Fig. 6.2: Princípio de funcionamento da bomba duplo pistão



Fig. 6.3: Sistema de bombeamento baseado em reboque Aliva®-272 com uma bomba de pistão duplo



Fig. 6.4: Aliva®-101 Quick Connect é compatível com qualquer sistema padrão de liberação rápida



Fig. 6.5: Aliva®-503.3 - Mini sistema de projeção para concreto



Fig. 6.6: Aliva®-520 - Sistema de projeção para concreto

6.2 PROCESSO DE FLUXO AERADO

No caso de menores aplicações de concreto projetado, por exemplo, onde é necessária alta flexibilidade na instalação, materiais e/ou cronograma de trabalho, o processo de fluxo aerado é preferencial. Hoje em dia, esse processo é realizado principalmente por meio de máquinas à rotor.

O processo de fluxo aerado consiste em três etapas:

- Entrega de uma mistura de concreto (seco, semi úmido ou úmido)
- Alimentação pneumática da mistura, em um fluxo aerado, através da tubulação até o bico de projeção
- Projeção do concreto com água adicionada no bico de projeção ou a poucos metros deste (seco ou semi úmido) ou a adição de um acelerador (úmido)

Uma vez que a mistura de concreto projetado é transmitida pneumáticamente (em um fluxo aerado), o concreto projetado não precisa de mais dispersão no bico. As máquinas de projeção para o processo de fluxo aerado são consideravelmente menores do que aquelas para o processo fluxo denso, portanto, essa técnica é ideal para muitas aplicações de reabilitação, especialmente aquelas em que há limitações de espaço que podem impedir o trabalho.

Se necessário, um acelerador para concreto projetado é alimentado por uma unidade de medidora através de mangueiras separadas até o bico. No caso de misturas secas ao forno, no entanto, os aceleradores podem ser substituídos pelo uso de cimentos especiais que dão pega rapidamente em um tempo muito curto após o contato com água.

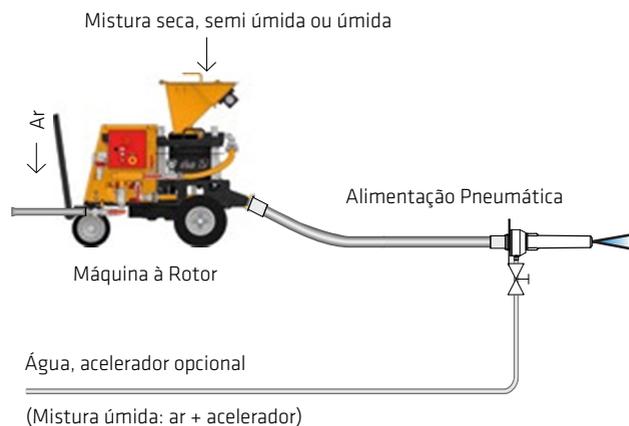


Fig. 6.7: Processo de fluxo aerado para concreto projetado via úmida ou seca

6.2.1 VANTAGENS

O processo de projeção fluxo aerado é o método tradicional de aplicação de concreto projetado e bem conhecido por todo o mundo. Suas vantagens residem em sua flexibilidade em relação à aplicação e desempenho:

- Manuseio simples e fácil limpeza do equipamento
- Resistência inicial muito alta para selamento preliminar ou estabilização (gunites especiais)
- Tempo de estoque quase ilimitado (disponibilidade) do material seco em silo
- Sem desperdício de concreto
- Pode ser usado para concreto projetado via úmida

Com o concreto projetado via seca, a economia é afetada pelas quantidades de reflexão e geração de poeira e pelos custos de desgaste mais elevados. As aplicações ideais para o processo de fluxo aerado usando misturas secas e concreto projetado seco usinado são:

- Reparos de concreto
- Selamento preliminar em altas penetrações de água
- Pequenos a médios trabalhos de projeção
- Conceito logístico não dependente do tempo (estoque na obra)

O processo de fluxo aerado para concreto projetado via úmida é preferencialmente usado em pequenas aplicações de mistura úmida e é benéfico devido às suas menores exigências em relação a finos e volume de pasta, uma vez que não precisa da lubrificação da linha como é no caso do fluxo denso. Assim, os requisitos de dosagem tendo em vista a capacidade de bombeamento são menos exigentes.

6.2.2 EQUIPAMENTO PARA O PROCESSO DE FLUXO AERADO

Ambos os sistemas de projeção manual e mecânico são utilizados para o processo via seca. Uma vez que o concreto projetado via seca é muito frequentemente usado para projetos com menores taxas de projeção, a aplicação manual por um mangoteiro treinado é muito mais importante do que para o processo de fluxo denso. Como descrito anteriormente, as misturas secas são geralmente aplicadas por máquinas de rotor, que podem diferir por:

- Rendimento de projeção (m³/h)
- Usos (seco/semi úmido/úmido)
- Força motriz (pneumático/elétrico)
- Tamanho da unidade de projeção (dimensões/peso)
- Controle (manual/parcialmente automatizado)
- Operação (na unidade/por controle remoto)
- Instalações adicionais necessárias (unidades medidoras/equipamento de limpeza)

As máquinas à rotor são robustas em design e têm uma longa tradição de uso bem-sucedido, mas ainda há espaço para desenvolvimento, provavelmente concentrando-se nas seguintes áreas:

- Aumento da resistência ao desgaste das peças
- Melhoria da proteção contra poeira
- Câmara de preenchimento mais eficiente

Descrição funcional das máquinas à rotor Aliva®

O material no enchimento da tremonha (7) desliza para a câmara à rotor (6). Girando o rotor (2) e o ar conectado ao topo (1) o material alimentado é transportado para a câmara de saída (5). Com o suporte do ar inferior (3) o material chega à linha transportadora (4). É transportado de lá em um fluxo aerado para o bico de projeção, onde o aditivo necessário é então misturado.

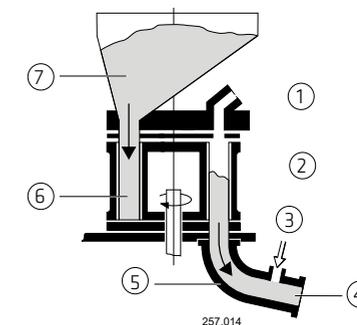


Fig. 6.8: Princípio operacional da máquina tipo rotor



Fig. 6.9: Máquina Aliva®-257

7 APLICAÇÃO DO CONCRETO PROJETADO

7.1 SAÚDE E SEGURANÇA

Saúde e Segurança é uma questão central em toda a indústria da construção, mas isso é particularmente importante na aplicação de concreto projetado, pois isso combina componentes potencialmente perigosos e máquinas de alta potência com um método de aplicação no qual o concreto é projetado por meio de ar e aplicado sobre a cabeça. Finalmente, há o próprio concreto projetado recém-aplicado, que é um sério problema de segurança por sua natureza e pela área de aplicação.

Concreto projetado é provavelmente uma das aplicações e usos mais sofisticados de concreto. Seus usuários e pessoas nas imediações devem ser protegidos.

Além das informações resumidas abaixo, todas as regulamentações locais relevantes e mais específicas relativas SSMA devem ser seguidas e totalmente consideradas quanto necessárias para os materiais, equipamentos e processos de aplicação.

7.1.1 SAÚDE, SEGURANÇA E MEIO AMBIENTE (SSMA) PARA CIMENTO

Um componente chave do concreto projetado é o cimento. Cimento é um pó inorgânico extremamente fino que contém principalmente compostos de óxidos de alumínio e silício. Devido à sua composição, o cimento traz vários perigos:

- Como pó inorgânico pulverulento há o alto risco de pneumoconiose (silicose) para as pessoas que trabalham com o material seco.
- Além disso, devido à alta afinidade do cimento com umidade, sempre que o cimento seco entra em contato com a pele ele sofre uma reação altamente alcalina e é fortemente cáustico ao tecido humano. Também pode resultar em uma forte dermatite/eczema (queimaduras de cimento).
- Os cimentos Portland sempre contém cromato (Cr IV), o que pode levar a uma reação alergia através do contato regular com a pele. Este perigo é reduzido pela adição de redutores de cromato, mas nunca é completamente excluído.

Assim, ao trabalhar com cimento ou materiais cimentícios, os equipamentos mínimos de proteção individual (EPI) devem incluir proteção eficaz da pele, dos olhos e respiratória.

7.1.2 SSMA PARA A MISTURA DE CONCRETO

Para o concreto fresco, além dos problemas potenciais de poeira, se aplicam os mesmos problemas de saúde e segurança que para o cimento: especialmente para a alta alcalinidade da pasta de cimento (pH alto >12), mas também a questão potencial do cromato deve ser considerada ao se trabalhar com concreto fresco.

Proteção eficaz da pele, dos olhos e respiratória são os equipamentos mínimos de proteção individual.

7.1.3 SSMA PARA ADITIVOS DE CONCRETO PROJETADO

Normalmente, as questões de SSMA em relação aos aditivos são apenas relevantes durante a produção da mistura de concreto. Na usina, as instruções detalhadas na Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico (FISPQ) para cada aditivo devem ser seguidas.

Para o concreto projetado, ao contrário do concreto convencional, há uma diferença, na medida em que há também o acelerador como um importante aditivo, que tem que ser manuseado e adicionado na obra. Todas as pessoas envolvidas em trabalhos de concreto projetado devem estar cientes do acelerador utilizado e de aspectos específicos constantes na FISPQ, tais como:

- Causticidade, especialmente para produtos alcalinos (os quais requerem proteção para os olhos, pele e vias respiratórias)
- Corrosão de aço comum por produtos livres de álcalis (requerem tanques de armazenamento e peças componentes de equipamentos em aço inoxidável ou plástico)
- Procedimentos para lidar com quaisquer vazamentos ou derramamentos etc.

A FISPQ do produto deve ser cuidadosamente considerada. Em termos gerais, todos os equipamentos usuais de proteção pessoal para manuseio e uso de produtos químicos devem ser utilizados.

7.1.4 APLICAÇÃO COM EQUIPAMENTO PESADO

Ao lidar com concreto projetado em construção subterrânea há a questão-chave do espaço confinado com pouca iluminação e ventilação. Conseqüentemente, precauções devem ser tomadas durante todo o processo de trabalho com concreto projetado, as quais todas as pessoas envolvidas devem ser devidamente treinadas e conscientes, incluindo:

- Transporte da mistura de concreto em veículos de grande porte no local e especialmente abaixo da superfície requer dirigir com cuidado e olhar para frente, vestindo roupas protetoras de alta visibilidade, iluminação adequada no veículo (e mantê-lo limpo), e um alarme de ré.
- Transferência da mistura para o equipamento de projeção com equipamentos de segurança pessoal completos (EPI com proteção dos olhos contra respingos sendo particularmente importante)
- Alimentação de concreto sob alta pressão, ar, e acelerador de concreto projetado até o ponto de aplicação por aspersão: Manutenção do equipamento conforme as diretrizes do fabricante (verificando regularmente os tubos e mangueiras de alimentação), uso de empregados com capacitação técnica apropriada, equipamentos de proteção individual, e garantia do fornecimento adequado de iluminação e ventilação do local.

- Aplicação do concreto projetado: Equipamento de proteção individual (óculos resistentes a impacto, capacete, luvas, aparelho respiratório, protetores de ouvido, botas de segurança, roupa de corpo inteiro), sem entrada em áreas desprotegidas, áreas recém projetadas, iluminação e ventilação adequadas.
- Pessoas que não estão especificamente envolvidas no processo de projeção não devem estar nas proximidades das operações de projeção. É apenas o mangoteiro que é permitido permanecer ali.

7.1.5 CONCRETO PROJETADO PARA A ESTABILIZAÇÃO DE ESCAVAÇÕES

Os perigos mais graves durante as aplicações de concreto projetado para estabilizar áreas escavadas são, sem dúvida, o risco de concreto recém projetado ou substrato instável cair sobre as pessoas. Um plano significativo e uma organização integral das obras são essenciais para as seguintes questões:

- Todas as pessoas que trabalham com concreto projetado devem ser bem treinadas e ter um bom conhecimento da tecnologia.
- Somente o mangoteiro/operador de equipamento é permitido ficar na área de trabalho.
- O desenvolvimento de resistência à compressão do concreto projetado jovem (ex.: concreto projetado J2) deve ser assegurado mediante testes de controle de qualidade frequentes e regulares tanto do concreto fresco quanto do concreto projetado jovem, por até 24 horas, de acordo com os requisitos de desempenho.
- Ninguém nunca trabalha ou fica sob o concreto recém projetado, especialmente no período de tempo de uma hora desde a projeção.

7.2 SUBSTRATOS

A ligação entre o concreto projetado e o substrato só pode ser boa quanto a qualidade das duas faces de contato. Devido ao seu teor de ligantes e alta velocidade de impacto do jato, o concreto projetado tem as condições certas para uma forte ligação entrelaçada com o substrato e, então, pode desenvolver alta resistência de aderência. Portanto, a outra face de contato, o substrato, geralmente é o fator limitante na ligação.

O substrato deve estar livre de poeira e partículas soltas ou friáveis com baixa adesão. Além disso, a superfície deve ser previamente umedecida para evitar que a área de ligação seque, devido aos efeitos de absorção da rocha seca recém-escavada, ou camadas anteriores de concreto projetado. A força da operação de limpeza depende da força coesiva interna do substrato e a exigência de água baseia-se no teor de umidade natural da superfície.

A superfície deve ser molhada imediatamente antes de cada projeção para evitar que uma camada de poeira seja formada. O mesmo se aplica se o concreto projetado for construído camada por camada. Em áreas com alta infiltração de água, é necessário o pré-selamento da superfície e/ou drenagem do excesso de água.

7.3 PROJEÇÃO

Concreto projetado e argamassa são aplicados em camadas, seja na mesma operação, projetando repetidamente sobre a mesma área, ou em uma operação subsequente após uma parada. Depois de uma longa pausa, a superfície deve ser limpa e umedecida novamente. A quantidade de material que pode ser aplicado em uma operação depende de vários fatores:

- Resistência de aderência da mistura de concreto projetado
- Natureza do substrato ou camada de base
- Processo de projeção
- Rendimento de projeção
- Direção de projeção (para cima, horizontalmente)
- Obstruções (armaduras/ingresso de água)

Diferentes abordagens são necessárias para diferentes direções de projeção. Ao projetar para baixo, camadas de qualquer espessura podem ser aplicadas. Deve assegurar-se que a reflexão está incrustada ou eliminada, para que não permaneça na superfície.

Ao projetar horizontalmente, a espessura necessária pode ser construída gradualmente em finas camadas, ou para aplicações muito espessas, a espessura total pode ser aplicada de baixo para cima projetando em camadas. Aqui novamente a reflexão deve ser removida da parte inferior antes da aplicação da próxima camada.

Ao projetar em áreas sobre a cabeça, o peso dos materiais e a adesão do concreto projetado ao substrato, efetivamente se neutralizam uns aos outros, de modo que várias camadas finas tenham que ser usadas para a camada total requerida. Como regra geral, um menor rendimento de projeção e camadas mais finas geram menos reflexão, propiciando um melhor resultado no final.

O concreto projetado deve ser aplicado em ângulos retos ao substrato ou concreto prévio. Isso maximiza a adesão e compactação, bem como minimiza a reflexão. O concreto projetado ou argamassa é aplicado manualmente ou mecanicamente em movimentos circulares uniformemente sobre toda a superfície. Projetar sobre telas de aço é particularmente difícil e requer experiência, porque as cavidades devido às sombras de projeção sob as armaduras são um problema potencial sério. Aliás, quando possível, este problema é evitado pelo uso de concreto projetado reforçado com fibras.

A distância ideal para projeção geralmente está dentro da faixa de um a dois metros (para projeção em robô), mas isso deve ser determinado para cada caso individual. Se a distância do bico for muito pequena, isso resultará em maior formação de poeira e reflexão. Se a distância do bico é muito grande, o concreto projetado não será suficientemente bem compactado no substrato.

Regras de aplicação de projeção

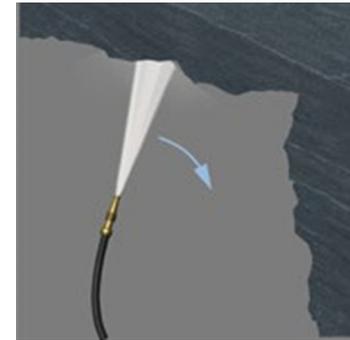


Fig. 7.1: Limpeza da poeira do substrato com água



Fig. 7.2: Preenchimento de overbreaks



Fig. 7.3: 1ª camada de concreto projetado - 1ª estabilização da escavação e ponte de aderência para a 2ª camada de concreto projetado

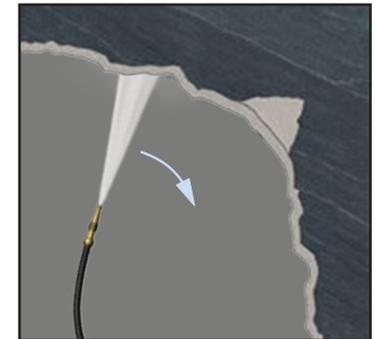


Fig. 7.4: Remoção de poeira com água após longas pausas



Fig. 7.5: 2ª camada de concreto projetado - estabilização da escavação, usualmente junta com armadura de aço



Fig. 7.6: Correta manipulação do mangote - ar demasiado causa reflexão e um elevado volume de projeção causa laminação

7.4 CONFIGURAÇÕES DE BICO DE PROJEÇÃO

O bico de projeção é um dos elementos mais importantes do sistema de projeção e representa a principal peça de desgaste no processo de concreto projetado. A mistura completa de ar, concreto e acelerador de pega ocorre dentro do bico de projeção. No contexto do concreto projetado, o termo bico de projeção refere-se a toda a configuração constituída pelo conversor ou anel de água e a ponta de projeção. Dentro do bico, a mistura de concreto inicialmente passa por um conversor (úmida, fluxo denso) ou um anel de água (seca, fluxo aerado):

- No conversor, o fluxo denso é mudado para um fluxo aerado com a ajuda de ar comprimido, o qual também alimenta o acelerador no concreto projetado.
- O anel de água é usado para a adição de água de amassamento na mistura seca, a qual pode opcionalmente também adicionar um acelerador.

Após o conversor ou anel de água, a mistura aerada passa pela ponta do bico onde a mistura é ainda mais homogeneizada e o jato final é moldado. As pontas modernas dos bicos são feitas de polímeros especiais com formas e propriedades otimizadas, projetadas para obtenção de concreto projetado corretamente misturado e aplicado. A boa condição de todo o sistema de bico de projeção, ou seja, o conversor e a ponta do bico de projeção, é necessária para bons resultados de projeção. Concreto projetado é produzido a partir de um processo de construção holístico compreendendo materiais e o processo. Qualquer equipamento que está desgastado ou em má condição, e em particular o bico de projeção, tem uma influência significativa no resultado deste processo.

As diferentes combinações de materiais e processos de concreto projetado resultam em diferentes configurações de bico de projeção. Os diferentes componentes do concreto projetado são então reunidos e homogeneizados de forma adequada. No final, independentemente do processo de projeção ou do material selecionado, um concreto projetado adequado de alta qualidade é obtido. As combinações de materiais típicos e configurações de bico de projeção são retratadas na Figura 7.7 a 7.9, respectivamente.

A configuração do bico de projeção depende, tanto do processo como da escolha dos aceleradores. Os aceleradores alcalinos são, preferencialmente, adicionados dois a cinco metros à frente do bico de projeção. Isso garante uma melhor mistura com o concreto e permite um tempo de reação um pouco mais estendido. Como resultado, menos poeira e névoa cáustica de acelerador são produzidos e melhores resultados de resistências iniciais são alcançados. Todos os problemas potenciais com materiais cáusticos são eliminados usando aceleradores livres de álcalis. A adição de aceleradores livres de álcalis, no entanto, deve ser realizada apenas no bico, não antes, vide que são extremamente reativos inicialmente.

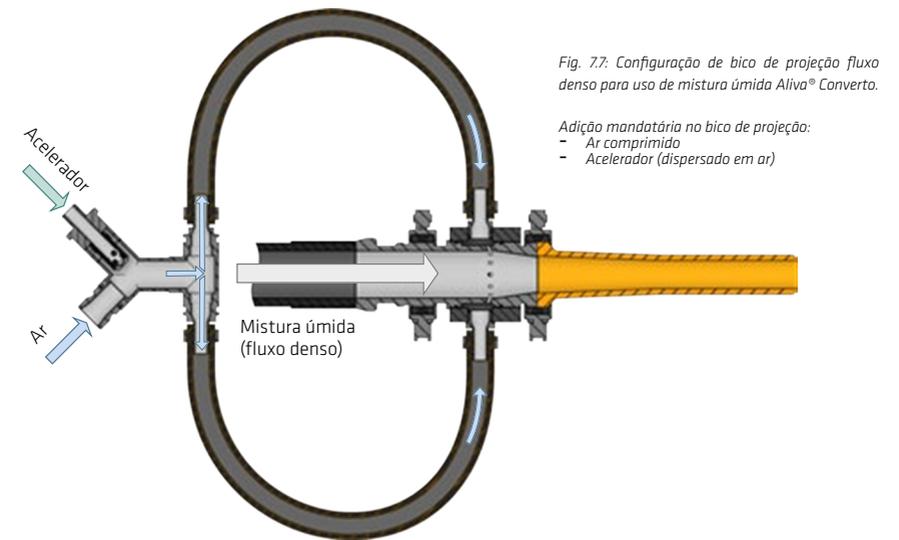


Fig. 7.7: Configuração de bico de projeção fluxo denso para uso de mistura úmida Aliva® Converto.

- Adição mandatória no bico de projeção:
- Ar comprimido
 - Acelerador (dispersado em ar)

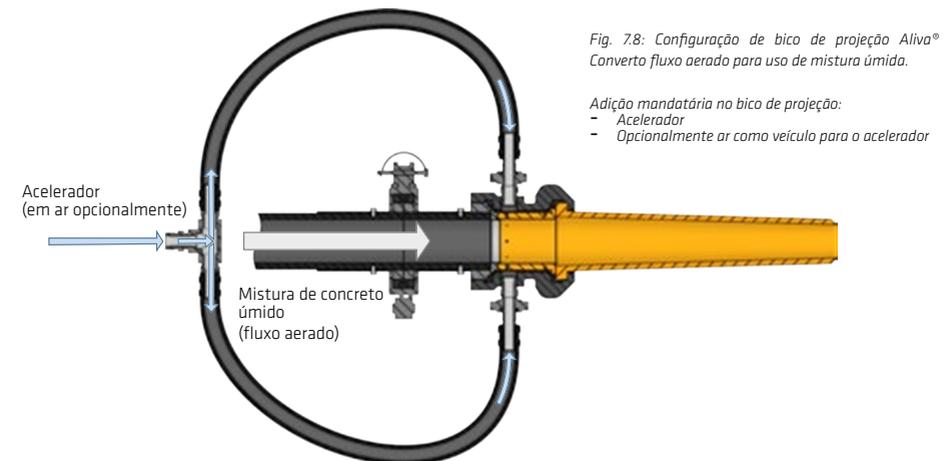


Fig. 7.8: Configuração de bico de projeção Aliva® Converto fluxo aerado para uso de mistura úmida.

- Adição mandatória no bico de projeção:
- Acelerador
 - Opcionalmente ar como veículo para o acelerador

Água (opcionalmente com acelerador)

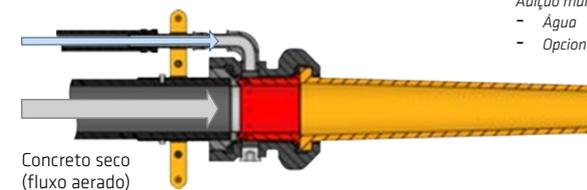


Fig. 7.9: Configuração de bico de projeção Aliva® Converto para uso de misturas secas.

- Adição mandatória no bico de projeção:
- Água
 - Opcionalmente o acelerador (dissolvido em água)

Bicos de projeção de alta qualidade são projetados para concentrar o jato e conduzir todo o material para o substrato sem perdas, distribuindo partículas uniformemente sobre a seção transversal do jato.

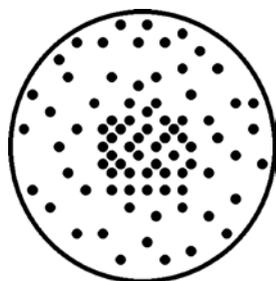


Fig. 7.10: Má distribuição das partículas na seção transversal do jato

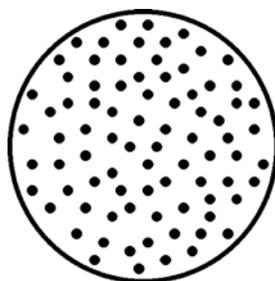


Fig. 7.11: Boa distribuição das partículas na seção transversal do jato

7.5 REFLEXÃO

Reduzir a reflexão durante o processo de projeção é um dos desafios mais complexos para o concreto projetado. É de grande importância econômica e logística, pois qualquer reflexão significa em aumento do desperdício de materiais e o dobro do tempo requerido para o trabalho. As influências sobre este parâmetro são diversas e o controle sistemático é infelizmente, extremamente difícil. O fator mais importante é certamente a habilidade do operador de projeção. Suas habilidades técnicas e experiência influenciarão significativamente a quantidade de reflexão.

Os fatores que influenciam a quantidade de reflexão incluem:

- Experiência e habilidade técnica do operador de projeção (mangoteiro)
- Direção de projeção (para cima, para baixo, horizontal)
- Parâmetros de projeção (pressão de ar, bico de projeção, rendimento de projeção)
- Processo de projeção (denso/fluxo aerado)
- Condição dos equipamentos
- Dosagem do concreto projetado (agregados, curva granulométrica, acelerador, fibras, ligantes)
- Desempenho do concreto projetado (resistência muito inicial, resistência de aderência, espessura de camada)
- Condição do substrato (uniformidade, limpeza)

Reflexão varia durante o processo de projeção. No primeiro momento, quando o concreto projetado atinge diretamente o substrato sólido, a reflexão é muito maior. Devido à alta energia cinética do material projetado, o agregado graúdo no primeiro passe é perdido por reflexão. Assim, uma fina camada remanescente de areia e pasta de ligantes é formada na interface, que é forçada pela pressão sobre as menores fissuras e cavidades na superfície do substrato, criando uma excelente camada de ligação.

Posteriormente a reflexão diminui e o concreto projetado também compreende mais de todos os outros componentes e tamanhos de partículas. A quantidade de reflexão é então controlada pela resistência de aderência do concreto projetado.

Quantidade de reflexão

Sem medições da reflexão real sob as condições predominantes no local, a quantidade só pode ser aproximadamente estimada. Pela experiência, os valores típicos em aplicações de concreto projetado vertical são:

- Reflexão com concreto projetado via seca 20 - 30 %
- Reflexão com concreto projetado via úmida 5-15 %

Reutilização/Descarte

Em princípio, a reflexão de concreto projetado é um material de concreto reciclável com todos os componentes da mistura original. No entanto, isso deve ser confirmado, pois pode estar contaminado (poluído) por quaisquer condições adversas e exposição no local. Como no concreto estrutural, uma pequena proporção de no máximo 10 a 20 % de reflexão de concreto projetado tratado corretamente pode ser reutilizado nos agregados.

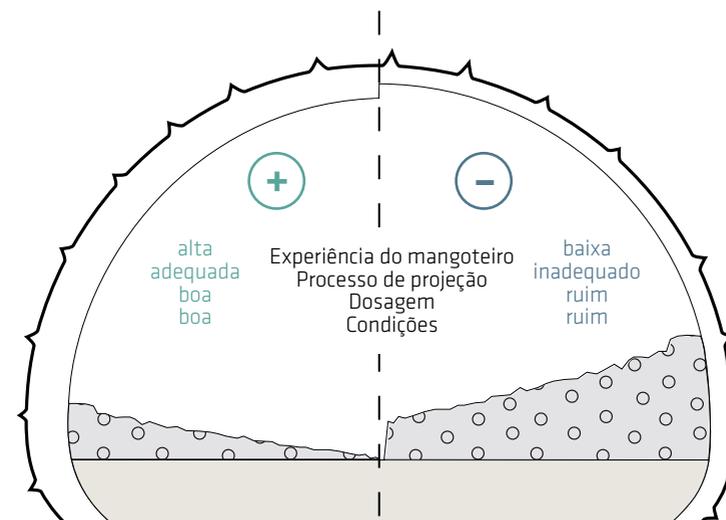


Fig. 7.12: Influências sobre a reflexão

7.6 DESENVOLVIMENTO DE POEIRA

A poeira ocorre com qualquer tipo de aplicação de concreto projetado, mas as quantidades e tipos de poeira diferem consideravelmente. Com concreto projetado via seca há um maior problema de poeira, uma vez que os componentes têm uma tendência natural de gerar poeira. A quantidade de poeira gerada pode ser reduzida por vários meios, incluindo:

- Uso de agregados semi úmidos (em vez de secos ao forno)
- Boa manutenção/vedação da máquina a rotor e todo sistema de transporte
- Parâmetros ajustados e equilibrados corretamente no bico de projeção (ar mínimo, água suficiente, mínimo de acelerador)
- Baixa pulsação durante alimentação do material
- Uso de aceleradores para concreto projetado livres de álcalis
- Use de manipuladores de projeção para rendimentos > 6 m³/h
- Aditivos para concreto projetado para corrigir efetivamente a poeira depositada

Apesar de todas essas medidas, duas a quatro vezes mais poeira será gerada por concreto projetado via seca do que pelos métodos de projeção via úmida. Para melhorar ainda mais a segurança no local, apenas aceleradores de concreto projetado livre de álcalis devem ser usados.

7.7 SOMBRAS DE PROJEÇÃO COM TELAS DE AÇO

Se for necessário um revestimento de concreto projetado com maior absorção de energia, o concreto projetado pode ser combinado com tela de aço. Um problema resultante disso, no entanto, é o potencial para as chamadas sombras de projeção, que podem ocorrer durante a projeção na parte de trás das malhas o que influenciam negativamente as propriedades estáticas do revestimento total de concreto projetado.

Um operador de projeção experiente pode minimizar as sombras de projeção selecionando a sequência de projeção correta e parâmetros adequados de projeção. Ao preencher por trás de reforços, ajustes de parâmetros como taxa de alimentação, ar comprimido (possivelmente aumentando), a dosagem do acelerador (possivelmente reduzindo) e o enfoque de projeção como um todo devem ser adaptados à baixa acessibilidade. A importância do operador de projeção para essas situações é clara como o principal critério para concreto projetado de alta qualidade.

Alternativamente, em vez de reforço usando telas de aço, as fibras são uma alternativa, pois sombras de projeção não são um problema. Além disso, sua instalação é consideravelmente mais fácil, rápida e segura, já que ninguém precisa trabalhar na área de condução insegura antes que o concreto projetado seja aplicado.

7.8 LAMINAÇÃO (LENTE) E JUNTAS FRIAS

Concreto projetado é aplicado no substrato com alta energia. Isso resulta no substrato duro tendo a aspereza aumentada pelos agregados e, mais importante, a reflexão do substrato duro resulta em pasta de cimento acumulada como uma camada na zona intermediária entre o substrato e o concreto projetado. Esta zona enriquecida com cimento age como uma ponte de ligação e aumenta a resistência de aderência entre o substrato e a camada de concreto projetado.

Após a primeira camada de ligação, o concreto projetado é aplicado em várias camadas e, a fim de obter um bom e homogêneo revestimento de concreto projetado, as camadas de concreto projetado mais finas aplicadas individualmente devem ser solidarizadas em si mesmas e com uma boa ligação entre as camadas assegurada. Para a projeção sobre camadas de concreto projetado previamente aplicadas, onde a peça não iniciou há muito tempo, os agregados do concreto recém projetado penetrarão na camada prévia de concreto projetado ainda macia e levarão à mistura entre as camadas.

Laminação (formação de lentes) geralmente acontecem quando as diretrizes (principalmente a preparação do substrato) não são seguidas adequadamente, ou quando a mistura de concreto, ar comprimido e acelerador no bico de projeção é ruim (por exemplo, orifício parcialmente bloqueado no injetor), e quando a taxa de preenchimento dos pistões ou rotores é ruim. Mistura não homogênea, baixa compactação no substrato, poeira presa, acelerador em excesso e forte pulsação do jato de projeção, podem levar a formação adversa de laminação na camada de concreto projetado aplicado.

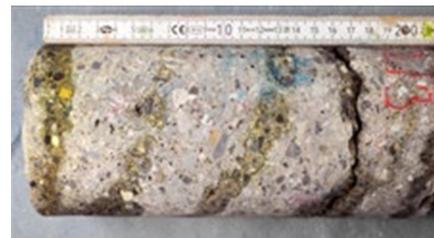


Fig. 7.13: Lentes de projeção bem visíveis em um testemunho

Para evitar tais lentes de projeção na camada de concreto projetado, todos os parâmetros relevantes devem ser otimizados individualmente, bem como em sua interação, relativo novamente aos componentes em termos de materiais, equipamentos e aplicação (habilidades do mangoteiro, regras de projeção):

- **Materiais**
Se a mistura de concreto estiver muito pegajosa/viscosa, tanto a capacidade de bombeamento quanto a de projeção serão afetadas negativamente. O grau de enchimento dos cilindros é menor, o que resulta em uma pulsação mais forte quando os pistões mudam. Além disso, todo o processo de projeção e compactação no substrato tornam-se difíceis. Um concreto projetado fluido é importante para alcançar uma boa mistura homogênea com o acelerador no bico de projeção e uma boa ligação e interação do material projetado sobre camadas prévias de concreto recém projetadas.
- **Condições do equipamento**
Como pré-requisito para uma camada homogênea de concreto projetado (não laminado), o jato de concreto deve exibir pulsação mínima. Para isso, todas as partes do equipamento de projeção devem estar funcionando corretamente e uma sincronia na alimentação dos componentes individuais do concreto projetado ao bico. Também um posicionamento impreciso (não horizontal) da máquina de projeção leva a um nível de enchimento mais baixo dos cilindros da bomba e, portanto, a uma pulsação mais forte e formação de lentes.
- **Aplicação**
No entanto, no final é o mangoteiro, cuja experiência e habilidades têm uma influência significativa na qualidade do concreto projetado e, portanto, também na possível formação de lentes. Uma abordagem sistemática do processo de projeção, por exemplo, de acordo com as regras de projeção da EFNARC, é tão importante quanto trabalhar dentro da faixa de desempenho razoável da máquina: um alto rendimento de projeção, apesar de todos os outros parâmetros bons, novamente tem uma influência negativa sobre o enchimento de dos cilindros e, portanto, no aumento da pulsação.

8 GERENCIAMENTO DE QUALIDADE DO CONCRETO PROJETADO

É um desafio e tanto definir todos os parâmetros mais adequados para a boa qualidade de concreto projetado (economia, tecnologia, logística, concreto, aditivos, meio ambiente) sem os requisitos e condições específicos para uma determinada obra. Estes devem, portanto, ser definidos para cada projeto antes do início das obras. Às vezes pode ser ainda mais um desafio manter tudo isso de forma constante e consistente durante todo o período de construção, que em projetos maiores pode durar vários anos.

Concreto projetado é um sistema holístico, não apenas uma dosagem especial, ou um tipo específico de equipamento, ou aplicação de concreto. Há um grande número de parâmetros que, devido à sua interação equilibrada, ajudam a garantir uma situação de trabalho segura no subsolo, ou se o controle de qualidade diminui - pode causar problemas e falhas do sistema de concreto projetado. Assim, os requisitos para todos os diferentes parâmetros e sua garantia de qualidade são muito altos.

Normalmente, o controle de qualidade é realizado periodicamente, o qual em caso de perda de qualidade, rapidamente se torna crucial para localizar e eliminar com segurança a causa de qualquer problema e potenciais falhas o mais rápido possível. Além da garantia de qualidade, uma interação construtiva entre todos os participantes do projeto é particularmente importante.

As diversas medidas disponíveis para controle de qualidade em todas as etapas da produção de concreto projetado, no local ou no laboratório, são descritas a seguir.

8.1 MATÉRIAS PRIMAS E QUALIDADE DO CONCRETO PROJETADO

O concreto projetado é baseado em uma combinação específica de materiais que estão sujeitos ao controle de qualidade individual, e além disso, existem requisitos especiais para sua aplicação:

8.1.1. MISTURA DE CONCRETO PROJETADO

- *Cimento* é ajustado e monitorado pelo fabricante de cimento em relação a sua composição química, mineralogia, finura e reatividade (com água). Normalmente não há medidas adicionais de controle de qualidade no que diz respeito ao uso de cimento em aplicações de concreto projetado e a química resultante. A combinação cimento aditivo deve ser bem testada antes do projeto e os resultados desses testes devem ser reconfirmados regularmente. Todo o conjunto complexo de reações de aceleração em concreto projetado é fortemente dependente da interação correta de todos os componentes e a química do cimento pode ser influenciada até mesmo por pequenos desvios, como na qualidade da água de amassamento.
- *Agregados* são monitorados por seus produtores para confirmar sua natureza, graduação, umidade e teor de finos. A curva granulométrica dos agregados é importante para a trabalhabilidade do concreto projetado via úmida. Coesão, bombeabilidade e aderência ao substrato também são questões importantes que estão diretamente relacionadas aos agregados. A fração de finos dos agregados também pode ter um impacto na química do concreto projetado, especificamente no desenvolvimento de resistências iniciais.
- (*Reatividade*) adições são monitoradas pelos seus fabricantes em relação a sua química, graduação e a reatividade pozolânica. Da mesma forma que o cimento, com adições reativas, a química específica das aplicações de concreto projetado não é levada em conta e, portanto, a seleção e o uso desses materiais devem ser testados (e confirmados novamente, posteriormente) para seu uso em dosagens específicas. Aqui, mais uma vez, pequenas mudanças em sua composição podem ter um efeito significativo na aceleração do concreto recém projetado.
- *Água* sempre tem que ser testada especificamente para cada projeto, especificamente quando não é água potável (fonte natural ou água reciclada), por exemplo, análises para confirmar teor de íons, exemplo: cloretos, sulfatos ou impurezas orgânicas, bem como o seu pH. Especialmente quando água de reuso é utilizada na obra, sua química inorgânica pode ser importante para confirmar sua adequabilidade em concreto projetado, mas geralmente não isto não é testado. A contaminação iônica potencial (sulfatos, íons de alumínio e cálcio) de água reciclada deve ter sua qualidade assegurada regularmente.
- *Aditivos* para concreto e concreto projetado são oriundos de indústrias químicas e, portanto, são submetidos a monitoramentos regulares muito minuciosos e uma certificação rigorosa (por exemplo, CE). Isso inclui a inspeção e o teste de matérias-primas químicas de entrada (especificações, impurezas) bem como o controle de produção dos aditivos (procedimentos de produção, especificações, impurezas químicas ou pureza, efeito no uso pretendido do produto). Aditivos para concreto projetado são também testados especificamente com respeito a seu uso pretendido em concreto projetado. A situação específica com aceleradores para concreto projetado é descrito adiante com mais detalhes.

- A mistura de concreto em si deve ser continuamente monitorada com relação a suas propriedades fundamentais, especialmente sua plasticidade/fluidez, teores de água e ar e sua coesão.

8.1.2. PRODUÇÃO DE CONCRETO PROJETADO

- O *equipamento* usado para projeção de concreto é especificamente projetado para sua adequação a este processo. Os produtores dessas unidades possuem alto nível de competência quanto a esse processo de construção e às demandas específicas para os produtos utilizados. No decorrer de um projeto, a condição do equipamento de projeção deve ser continuamente assegurada. Isso requer uma manutenção boa e regular, com um bom equilíbrio entre os fluxos de volume e as peças desgastáveis e consumíveis que devem ser sempre controlados. O sistema de bico de projeção e sua condição é particularmente importante. A maioria das oficinas mecânicas, mesmo em canteiros de obras maiores, geralmente não são especializados em tecnologia de concreto projetado. Por isso, recomenda-se sempre que o fabricante do equipamento de projeção seja consultado regularmente.
- O *operador* de projeção tem um alto nível de responsabilidade. Seus conhecimentos especializados e habilidades práticas são essenciais para bons resultados de concreto projetado e para a segurança associada à construção subterrânea. Treinamentos especializados adequados, bem como certificações estão disponíveis, mas estes ainda não são universalmente reconhecidos e necessários. Por exemplo, há a certificação para operadores de projeção de concreto American Shotcrete Institute (ASI) e o certificado do operador de projeção da EFNARC na Europa. Esses certificados garantem que os operadores sejam bem treinados e suas habilidades sejam confirmadas com relação a materiais, equipamentos e todo o processo de construção em concreto projetado. O objetivo é garantir a qualidade da aplicação do concreto projetado (segurança do trabalhador), bem como a qualidade do revestimento de concreto projetado aplicado como um todo (segurança dos trabalhadores durante a proteção do concreto projetado em idades iniciais, bem como o trabalho seguro na área de escavação).
- *Condições ambientais* também desempenham um papel importante em relação à qualidade do concreto projetado. Por exemplo, existem diferenças e efeitos importantes se o concreto projetado for aplicado subterrâneo ou acima do solo, usando materiais mais ou menos frios, com forte ventilação, ou com baixos/altos níveis de umidade. A temperatura dos materiais e condições ambientais afetam substancialmente o desempenho do concreto projetado até 24 horas. Especialmente, se a temperatura da mistura de concreto é inferior a 15°C, então seu uso no concreto projetado torna-se seriamente perigoso. A perda de umidade no concreto recém projetado desempenha um papel importante na qualidade do concreto projetado, pois durante a maturação inicial do cimento, que é a fase mais forte da hidratação do cimento, alta perda de umidade por baixa umidade ambiental ou excesso de ventilação, pode resultar em hidratação inadequada do cimento e menor qualidade do concreto projetado. Para concreto projetado, especialmente em posições aéreas, medidas típicas de cura de concreto não funcionam. Em túneis e mineração, no entanto, a umidade ambiente geralmente é alta o suficiente e não requer medidas específicas de cura para garantir uma perda de umidade adequadamente baixa da superfície. Se este não for o caso (ambiente muito seco, ventilação forte), agentes de cura interna ainda não são recomendados para concreto projetado, pois eles também podem afetar adversamente o desenvolvimento da resistência inicial e reduzir a ligação de camadas subsequentes. Se realmente necessário, outras medidas adequadas devem ser tomadas, por exemplo, umedecer ativamente a superfície do concreto projetado por um tempo apropriado.

8.2 CONTROLE DE QUALIDADE NA OBRA

O monitoramento contínuo e regular de controle de qualidade no local é altamente recomendado para aplicações de concreto projetado. Existem medidas mínimas que devem ser asseguradas e documentadas, incluindo:

■ Protocolo de dosagem/preparação do concreto:

Dosagem planejada e realizada com a listagem das quantidades dosadas de todos os componentes.

■ Testes do Concreto Fresco:

- Aparência geral da mistura (sem exsudação, coesa)
- Consistência da mistura: abatimento ou espalhamento flowtable
- Teor de ar
- Teor de água
- Garantia da curva granulométrica (certificados dos agregados & dosagem)
- Volume de Pasta (dosagem, graduação, teor de cimento & adições)
- Qualidade da pasta (relação a/c ou a/l, coesão, exsudação,...)

■ Documentação de projeção:

- Configurações dos equipamentos (taxa de alimentação do concreto, consumo de cimento na mistura, densidade e dosagem do acelerador)
- Parâmetros do Equipamento (taxa de alimentação do concreto e acelerador, pressão hidráulica, pressão de ar)
- Preparação do substrato

Tabela 8.1: Controle de qualidade para projetado EFNARC-Referenz

| Etapa do processo | Assunto | Item de teste | Frequência |
|----------------------|-------------------------------|---|---|
| Componentes | Agregados | Umidade Curva granulométrica | Cada entrega Periodicamente |
| | Cimento/Adições | Documentos de entrega | Cada entrega |
| | Aditivos | Documentos de entrega | Cada entrega |
| Produção de Concreto | Usina de concreto | Balanças, misturador, etc., | Conforme plano de manutenção |
| | Produção Concreto | Dosagem | Cada entrega |
| | Teste concreto fresco | Teor de água Densidade concreto fresco Temperaturas (concreto/ar) Consistência Teor de Ar | Periodicamente |
| Transporte | Equipamento de transporte | Manutenção | Conforme plano de manutenção |
| Aplicação | Unidade de concreto projetado | Manutenção Dosagem Acelerador | Conforme plano de manutenção Diariamente |
| | Concreto projetado | Consistência Desenv. Resistência Resist. Comp. Final Durabilidade Reflexão | Conforme plano de testes |

■ Ensaios de desempenho do concreto projetado

- Visualmente (projeção, verticalmente e aérea)
- Medição de resistência inicial (0 - 24 h) usando penetrômetro/agulha de Meynadier e testes de penetração de cavilhas. Concreto projetado a ser aplicado sobre a cabeça deve alcançar um desenvolvimento mínimo de resistência de J2 conforme a European Standard for Shotcrete.
- > Regra de ouro: para aplicação aérea deve ser assegurado aproximadamente
 - 1 MPa após 1 h
 - 4 MPa após 4 h
 - 10 MPa após 24 h
- Ensaios de absorção de energia para concreto projetado reforçado com fibras

8.2.1 CLASSES DE RESISTÊNCIA E DESEMPENHO DE CONCRETO RECÉM PROJETADO

O principal uso do concreto projetado é para estabilização de escavação subterrânea. Assim, segurança tem a prioridade máxima aqui. Uma característica essencial de qualidade do concreto projetado, portanto, é o seu desenvolvimento de resistência muito inicial, ou seja, a partir de seu enrijecimento inicial até 24 horas.

Dependendo do uso pretendido, as resistências do concreto recém projetado são divididas em três classes: J1, J2 e J3 (Austrian Sprayed Concrete Guideline, EN 14487).

- O concreto projetado classe J1 é apropriado para aplicação em camadas finas em um substrato seco. Não são esperadas demandas estruturais neste tipo de concreto projetado durante as primeiras horas após a aplicação.
- O concreto projetado classe J2 é usado em aplicações onde camadas mais grossas devem ser alcançadas em um curto espaço de tempo. Este tipo de concreto projetado alcança uma rápida capacidade de carga e pode ser aplicado sobre a cabeça para construir um revestimento de concreto projetado razoável, adequado para estabilização de escavação. Este tipo de concreto projetado faz parte do ciclo de trabalho habitual na construção subterrânea de perfuração & detonação.
- O concreto projetado classe J3 só é usado em circunstâncias especiais, por exemplo, para rochas altamente fragmentadas ou forte fluxo de água. Devido à sua pega rápida, mais poeira e reflexão ocorrem durante a projeção.

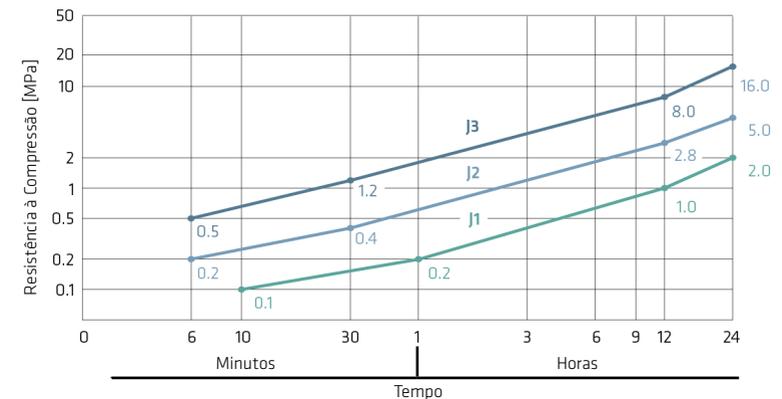


Fig. 8.1: Classes de resistência inicial do concreto projetado conforme a EN 14487-1

As propriedades de resistência à compressão do concreto recém projetado (o - 24 h) mudam em um amplo intervalo e, portanto, devem ser medidas por dois métodos diferentes, dependendo da magnitude da resistência: Pela medição com o penetrômetro portátil e pela penetração de cavilhas. Ambos os métodos fazem uso da correlação entre a força necessária para que uma agulha penetre e a resistência à compressão do espécime.

É preciso ter em mente que qualquer função de correlação para a avaliação desses dados de teste é necessariamente uma aproximação. Existem muitos parâmetros diferentes que podem influenciar os resultados obtidos por esses métodos, o que significa que eles podem exibir um desvio de dados muito alto impedindo-os de serem uma medição realmente confiável. Há uma dependência particular desses procedimentos de teste para a dosagem e agregados, da homogeneidade de projeção (equipamento, operador) e, por último, mas não menos importante, do operador dos dispositivos de teste. Assim, esse tipo de dados de controle de qualidade não pode ser tomado e avaliado como um conjunto de dados cientificamente profundo, mas é o procedimento mais adequado e prático para garantir um conhecimento razoável e monitorar as expectativas de segurança no local.

No entanto, as primeiras 24 horas de projeção representam sempre a faixa de tempo mais crítica em relação às questões de segurança em obras subterrâneas:

- Se considera que o concreto projetado permanece seguro sobre o substrato, mesmo aéreo, em uma camada de espessura adequada. Para isso, é preciso alcançar um constante aumento de resistência à compressão dentro de uma classe de resistência especificada.
- O ganho de resistência inicial é o efeito da reação de aceleração, principalmente durante os primeiros 60 - 90 minutos. Como regra de ouro, isso é alcançado com sucesso se a resistência à compressão - estimada com o teste de penetração - atingir o limiar de 1 MPa em 1h.
- O subsequente ganho de resistência à compressão deve-se principalmente à reação da hidratação do cimento, começando cerca de 2-3 h após a projeção e continuando durante toda a cura do concreto projetado. Para garantir que isso tenha acontecido corretamente, o método de penetração de cavilhas é usado e fornece evidências razoáveis, por exemplo, se o ganho foi de cerca de 4 MPa em 4h (e em curso, aumentando até 10 -15 MPa em 24 h).

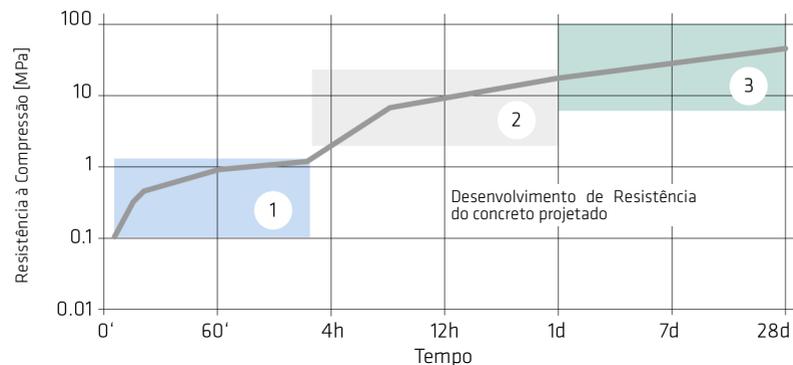


Fig. 8.2: Métodos para medição de desenvolvimento de resistência

Tabela 8.3: Métodos de medição de desempenho para concreto projetado

| Desenvolvimento de | Método | Instrumento | Resistência à compressão | Tempo |
|-----------------------------|------------------------|------------------------------------|--------------------------|----------|
| 1 Resistência muito inicial | Penetração de agulha | Penetromêtro (Agulha de Meynadier) | até 1,5 MPa | 0 - 3 h |
| 2 Resistência inicial | Penetração de cavilhas | Hilti DX 450-SCT | 3-20 MPa | 3-24h |
| 3 Resistência Final | Testemunhos | Prensa de resistência à compressão | 5 -100 MPa | 1 - 28 d |

8.2.11 MÉTODO DA PENETRAÇÃO DE AGULHA

O procedimento de medição de penetração da agulha é especificado em EN 14488-2 e este confirma que uma reação de aceleração adequada ocorreu no concreto projetado.

O método de penetração da agulha determina a força necessária para uma determinada profundidade de penetração, por exemplo, uma leitura é dada por uma célula de carga. Uma correlação adequada da força de penetração necessária para que uma agulha de 3 mm penetre 15 mm da superfície da amostra resulta na resistência equivalente do material testado. A ponta da agulha tem um ângulo de 60°. Normalmente, a média de dez leituras individuais por medição é utilizada para o cálculo de resistência à compressão.

O método de penetração da agulha não requer qualquer preparação especial da amostra, mas pode ser realizado em qualquer área de concreto projetado no local com uma espessura de camada de pelo menos 50 mm e que é acessível com segurança (sem concreto recém projetado sobre a cabeça!).

Resistência à compressão de concreto recém projetado

As propriedades do material concreto projetado especialmente durante sua(s) primeira (s) hora (s) são caracterizadas por uma transição gradual do estado plástico para o sólido. O termo "resistência à compressão" não é fisicamente preciso, pois a medida inicial de penetração da agulha descreve a mudança de plasticidade em relação à resistência à compressão, sem fazer uma distinção precisa entre estes. Quando se fala sobre a resistência à compressão inicial, tem que ser entendido que esta não é uma medição física exata de resistência à compressão, mas uma útil simplificação para comparar a adequabilidade do concreto projetado.



Fig. 8.3: Penetração em concreto recém projetado usando um penetrômetro digital (Mecmesin AFG 1000)

8.2.1.2 MÉTODO DE PENETRAÇÃO DAS CAVILHAS (HILTI)

Para determinar as resistências à compressão entre aproximadamente 3 MPa e 20 MPa, que representa tipicamente uma faixa de tempo de algumas horas até um dia, uma cavilha é penetrada na superfície da amostra sob uma determinada carga e, posteriormente, é arrancada. A resistência à compressão da amostra é calculada com a ajuda de curvas de calibração a partir de uma combinação da profundidade de penetração e da força de extração.

O método de cravação de pinos é especificado em EN 14488-2 e este é usado para garantir que a hidratação do cimento em concreto recém projetado tenha iniciado e continuado apropriadamente.

Basicamente, o método de cravação de cavilhas baseia-se nos mesmos princípios físicos do método de penetração da agulha para obtenção das resistências à compressão. A consideração da força de extração para o cálculo desse valor é, na verdade, aplicada apenas como uma correção que reduz o grau de dispersão de dados. Para leituras precisas é preciso que a profundidade de penetração do pino seja de pelo menos 20 mm e que a parte saliente do pino não seja dobrada. Este último pode resultar em interpretações erradas, já que uma parte substancial da energia de carga aplicada é absorvida pela deformação.



Fig. 8.4/8.5: Penetração de cavilhas em concreto recém projetado usando uma Hilti DX 450-SCT (esquerda) e medição da saliência do pino para a determinação da penetração (direita)

8.2.1.3 MÉTODO DA EXTRAÇÃO DE TESTEMUNHO

A resistência à compressão final é determinada usando testemunhos de concreto de acordo com EN 12504-1 "Testing concrete in structures".

A preparação de corpos de prova em dimensões adequadas para medições habituais de resistência à compressão é praticamente impossível por projeção direta em moldes, especialmente quando se considera que os espécimes devem ser lançados e curados em condições iguais ao do concreto projetado no local. Assim, amostras para medição de resistência à compressão, por exemplo para determinar a resistência de 28 d e qualquer eventual perda de resistência devido ao processo de projeção em comparação com a mistura antes da projeção, são tipicamente extraídas após um período adequado de cura (ex.: 7 d) diretamente da parede ou de painéis projetados representativos, que são preparados durante a aplicação no local, sob condições comparáveis.



Fig. 8.6/8.7: Extração de testemunhos de concreto projetado (esquerda) e medição de resistência compressiva de um testemunho (direita)

8.3 CONTROLE DE QUALIDADE EM LABORATÓRIO

Para projetos subterrâneos maiores e de vários anos, acompanhar o processo de construção utilizando um monitoramento mais detalhado em escala laboratorial seria aconselhável. Por um lado, isso impedirá o desenvolvimento de quaisquer danos graves ou interrupções no fluxo de trabalho e, por outro lado, será capaz de encontrar soluções rápidas para quaisquer problemas ou problemas que possam surgir. O teste laboratorial afeta tanto as amostras aplicadas como os materiais do concreto projetado.

Os testes típicos com amostras do local são:

- Resistência à compressão de testemunhos (resistências 1 - 28 d) bem como de cubos ou cilindros da mistura de concreto (28 d). Os testes dos testemunhos devem incluir sempre a documentação da amostra com propriedades visuais (homogeneidade, lentes, densidade/compactação), pois estes também dão uma boa indicação do estado do equipamento e/ou da qualidade da projeção.
- Ensaios de absorção de energia de painéis de concreto projetado reforçado com fibras. Sempre que um concreto projetado é reforçado com fibras, a absorção de energia necessária deve ser confirmada por testes regulares de amostras projetadas in loco. Este procedimento garante que todas as etapas de processo relevantes sejam consideradas em relação a dosagem efetiva e à perda potencial de fibras com a reflexão.

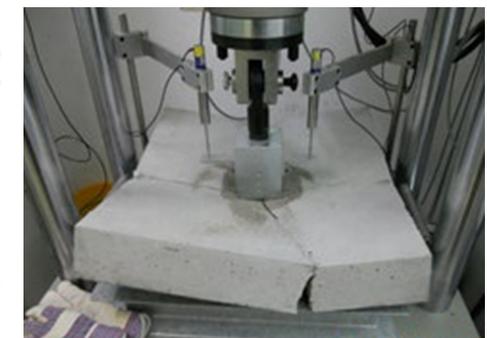


Fig. 8.8: Ensaio de absorção de energia de concreto projetado reforçado com fibras conforme a EN14488-5

Além do monitoramento habitual da qualidade dos materiais usados no concreto, podem ser aplicados novos testes laboratoriais, especialmente para os componentes quimicamente reativos (cimento, adições, água, aditivos) do concreto projetado:

Análise detalhada do cimento

O cimento é um produto natural que devido à sua matéria-prima e processamento sofre certos desvios ao longo do tempo, potencialmente afetando a aceleração no concreto projetado. Ao lado de sua composição química, a mineração e a finura do cimento podem ter um impacto substancial no desempenho do concreto projetado e isso pode ser monitorado por difração de raios-X em pó (DRX, mineralogia), adsorção de nitrogênio (BET, área de superfície específica) ou granulometria a laser (distribuição do tamanho de partículas).

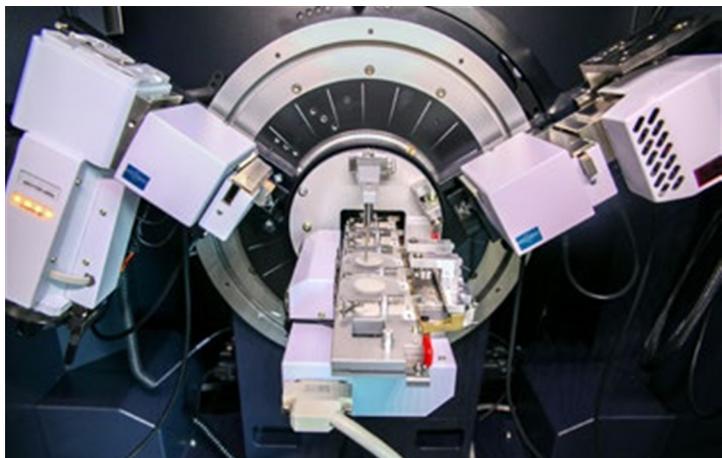


Fig. 8.9: Medição de DRX - Método do pó

Análise química da água de amassamento

Impurezas químicas na água de amassamento podem afetar fortemente a reação de aceleração, especialmente com água reciclada no local, desvios ao longo do tempo também devem ser considerados no que diz respeito ao seu alto potencial para causar falhas de desempenho. A água de amassamento deve ser monitorada de perto por análises químicas regulares.

Sika® MiniShot - Teste de aceleração de concreto projetado

A composição do acelerador é, devido ao seu processo de produção, bastante constante, no entanto, tem que interagir em um ambiente químico potencialmente em mudança. Os testes de pega são usados para validar outros materiais cimentícios, mas excluem o processo de mistura altamente específico no bico de projeção. Uma triagem laboratorial da interação cimento-água-acelerador, necessariamente tem que integrar essas condições de processo que é alcançável usando um moderno dispositivo de pulverização laboratorial, como o sistema de teste MiniShot (Figura 8.10/8.11). Este sistema de testes laboratoriais permite o monitoramento de interações químicas em um dado sistema de concreto projetado, usando a pasta equivalente do concreto projetado. A pasta equivalente é projetada em condições físicas similares ao concreto projetado original e, então, a aceleração e o desenvolvimento de resistências iniciais da pasta são constantemente monitorados usando espectrometria de ultrassom (Sika® Pulsment).



Fig. 8.10/8.11: Sika® MiniShot projeção em laboratório

9 GUIA DE SOLUÇÃO DE PROBLEMAS

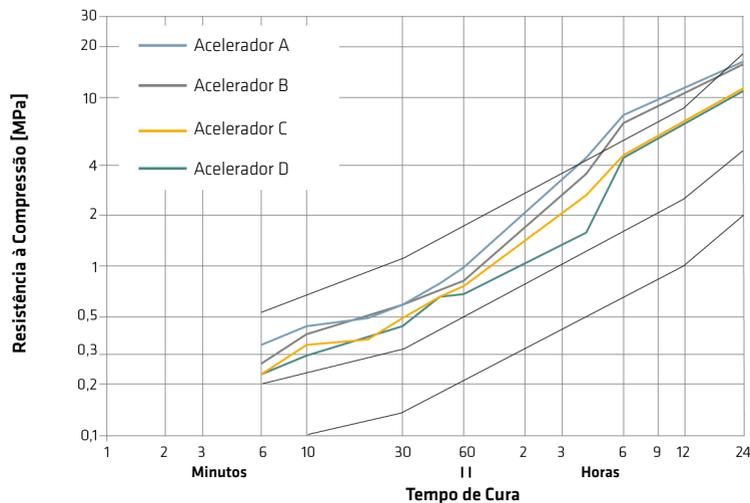
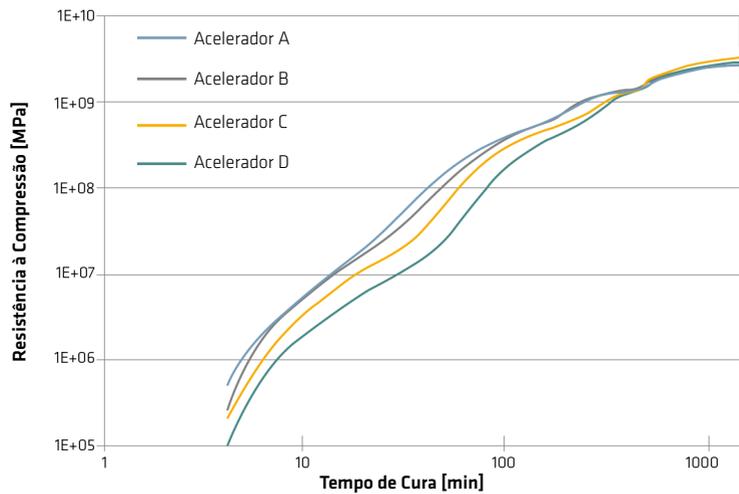


Fig. 8.12: Resultados de laboratório MiniShot (acima) comparado aos testes de campo (abaixo) com materiais idênticos (cimento, água de amassamento, finos de agregados e aditivos).

Os resultados deste teste não permitem uma previsão absoluta das resistências à compressão in loco, mas dão uma excelente comparação qualitativa. O módulo de cisalhamento determinado neste processo é uma medida direta da viscosidade da pasta, que essencialmente representa a mudança na resistência à compressão do concreto projetado (Figura 8.12). Quando o monitoramento MiniShot é aplicado regularmente, um desvio de qualidade in loco do concreto projetado pode ser correlacionado com a origem do problema, por exemplo, originário do cimento, aditivos ou água de amassamento.

Nota: Testes normalmente usados em testes de qualificação de argamassa ou cimento, como o teste da agulha de C11more ou Vicat, não são adequados para testar a pega de pastas ou argamassas aceleradas para representar as propriedades do concreto projetado. Estes métodos não são válidos ou confiáveis para concreto projetado porque os materiais específicos de mistura e projeção não são considerados.

Tabela 9.1: Guia de solução de problemas de desempenho do concreto projetado

| Problema | Abordagem | Solução do problema |
|--------------------------------|---|---|
| Compactação | Otimização da matriz mediante ajuste de dosagem | Curva granulométrica constante Teor de finos > 450 kg/m ³ Incorporação de adições |
| | Aumento da energia de compactação | Distância de bico de projeção 1,5 - 2,0 m Pressão de Ar 3,5 - 4,5 bar Limpeza do cabeçote de projeção |
| Resistência inicial | Melhoria da pega e endurecimento do concreto | Checar o consumo de acelerador |
| | | Redução da relação a/c ou a/l |
| | | Aumento do consumo de cimento |
| | | Aumento na dosagem de acelerador |
| | | Aumento da temperatura do concreto |
| | | Garantia de condições adequadas de cura (temperatura) |
| | | Mudança do tipo de acelerador |
| Mistura | Redução da pegajosidade/viscosidade | Redução no teor de finos |
| | | Aumento no teor de água |
| | Melhoria da homogeneidade do concreto projetado | Mudança no tipo de superplastificante |
| | | Aumento na dose de superplastificante |
| | | Aumento no teor de ar |
| Laminação (formação de lentes) | Aumento no preenchimento dos cilindros | Manutenção de máquina |
| | | Pressão de Ar 3,5 - 4,5 bar |
| | | Uso de cabeça de projeção giratória |
| | | Limpeza do cabeçote de projeção |
| | | Redução do rendimento/saída de concreto |
| | | Uso de concreto fluido (F5-F6) |
| | | Garantia de preenchimento apropriado da tremonha |
| | | Manutenção de máquina |

Tabela 9.2: Cuia de solução para problemas de bombeamento do concreto projetado

| Problema | Abordagem | Solução do problema |
|----------------------------------|--|---|
| Desempenho do concreto projetado | Melhoria da pega e endurecimento do concreto | Aumento da temperatura do concreto |
| | | Visar uma baixa relação a/c |
| | | Aumento do consumo de cimento |
| | | Aumento na dose de acelerador |
| | | Uso de cimento com alto teor de C ₃ A |
| | | Uso de cimento com maior finura |
| Bloqueios (entupimentos) | Melhoria de bombeabilidade | Curva granulométrica constante |
| | | Aumento no teor de finos |
| | | Aumento no teor de água (evitar exsudação!) |
| | | Aumento na dose de superplastificante |
| | | Uso de Sika® Stabilizer Pump (melhoria da trabalhabilidade) |
| | | Redução da saída de concreto (< 10 m ³ /h) |
| | | Uso de SikaPump®-Start 1 (ou lubrificação) |
| | | Aumento no teor de ar |
| | | Uso de SikaTard® (melhoria do tempo de trabalhabilidade) |
| | | Extensão do tempo de mistura para fibras |
| Mau funcionamento | Análise de falha conforme manual | Correção de falhas conforme guia de solução de problemas |

10 NORMAS E CUIAS RELACIONADOS AO CONCRETO PROJETADO

Esta seção destina-se a dar apenas uma visão geral das normas que estão relacionadas a concreto projetado. Existem muitas outras normas relacionadas ao concreto e seus constituintes que também são válidas para concreto projetado, as quais são detalhadas no Sika® Concrete Handbook.

NORMAS EUROPÉIAS

■ EN 934-5

Admixtures for concrete, mortar and grout - Part 5: Admixtures for sprayed concrete - Definitions, requirements, conformity, marking and labelling.

Definição e especificação dos requisitos e conformidade para aditivos especificamente destinados a uso em concreto projetado:

- Aditivos aceleradores de pega e aceleradores de pega não alcalinos
- Aditivos controladores de consistência
- Aditivos melhoradores de aderência.

■ EN 14487-1

Sprayed concrete - Part 1: Definitions, specifications and conformity

Definições, especificações e critérios de conformidade de concreto projetado via seca e úmida:

- Classificação relativa à consistência do concreto úmido
- Classes de exposição ambiental; concreto em idades iniciais, endurecido e reforçado com fibras
- Requisitos para materiais constituintes, para composição e mistura básica do concreto, para concreto fresco e endurecido e todos os tipos de concreto projetado reforçado com fibras
- Especificação para desenvolvimento de resistências iniciais

■ EN 14487-2

Sprayed concrete - Part 2: Execution

Detalhes sobre como executar corretamente a projeção de concreto em relação com as aplicações (reforço de solo, reparo e melhoria de estruturas existentes e para estruturas independentes):

- Requisitos para a execução de projeção de concreto tanto em processo via úmida quanto via seca
- Aplicável tanto a estruturas permanentes como temporárias

■ EN 14488 -Testing Sprayed Concrete

Métodos de teste dos requisitos de concreto projetado de acordo com suas especificações são descritos individualmente na Parte 2 à Parte 7.

- Part 1: Sampling fresh and hardened concrete
- Part 2: Compressive strength of young sprayed concrete
- Part 3: Flexural strengths (first peak, ultimate and residual) of fiber reinforced beam specimens
- Part 4: Bond strength of cores by direct tension
- Part 5: Determination of energy absorption capacity of fiber reinforced slab specimens
- Part 6: Thickness of concrete on a substrate
- Part 7: Fiber content of fiber reinforced concrete

NORMAS ASTM

■ ASTM C1141/C1141M

Standard Specification for Admixtures for Shotcrete

Compilação das normas que definem os requisitos para aditivos e adições relevantes para concreto projetado.

■ ASTM C1436

Standard Specification for Materials for Shotcrete

■ ASTM C1480/C1480M

Standard Specification for Packaged, Pre-Blended, Dry, Combined Materials for Use in Wet or Dry Shotcrete Applications

■ ASTM C1385/C1385M

Standard Practice for Sampling Materials for Shotcrete

■ ASTM C1604/C1604M

Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores of Shotcrete

■ ASTM C1140/C1140M

Standard Practice for Preparing and Testing Specimens from Shotcrete Test Panels

■ ASTM C1550

Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panels)

NORMAS ABNT

■ ABNT NBR 14026

Concreto projetado - Especificação

■ ABNT NBR 13069

Concreto projetado - Determinação dos tempos de pega em pasta de cimento Portland, com ou sem a utilização de aditivo acelerador de pega - Método de ensaio

■ ABNT NBR 14278

Concreto projetado - Determinação da consistência através da agulha de Proctor

■ ABNT NBR 13354

Concreto projetado - Determinação do índice de reflexão em placas - Método de ensaio

■ ABNT NBR 13317

Concreto projetado - Determinação do índice de reflexão por determinação direta - Método de ensaio

■ ABNT NBR 13317

Concreto projetado - Determinação do índice de reflexão por determinação direta - Método de ensaio

■ ABNT NBR 13597

Procedimento para qualificação do mangoteiro de concreto projetado aplicado por via seca - Procedimento

■ ABNT NBR 13070

Moldagem de placas para ensaio de argamassa e concreto projetados - Procedimento

■ ABNT NBR 13044

Concreto projetado - Reconstituição da mistura recém-projetada - Método de ensaio

■ ABNT NBR 16935

Projeto de Estruturas de concreto reforçado com fibras - Procedimento

■ ABNT NBR 16938

Concreto reforçado com fibras - Controle da qualidade

■ ABNT NBR 16939

Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo punção - Método de ensaio

■ ABNT NBR 16940

Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) - Método de ensaio

■ ABNT NBR 16941

Fibras de vidro álcali-resistentes (AR) para concreto e argamassa - Requisitos e métodos de ensaio

■ ABNT NBR 16942

Fibras poliméricas para concreto - Requisitos e métodos de ensaio

■ ABNT NBR 15530

Fibras de aço para concreto - Requisitos e métodos de ensaio

■ Austrian Society for Concrete Technology (öbv)

Austrian Sprayed Concrete Guideline

Tendo em vista a primeira edição em 1989 (aplicação) e 1992 (ensaios), o Austrian Sprayed Concrete Guideline pode ser considerado pioneiro em termos de garantia de qualidade de concreto projetado. Todos os aspectos dos materiais, requisitos, aplicação e garantia de qualidade são cobertos por este guia.

■ European Federation of National Associations Representing Producers and Applicators for of Specialist Building Products for Concrete (EFNARC)

European Specification for Sprayed Concrete

Especificação de materiais para concreto projetado, dosagem, requisitos, aplicação e controle de qualidade.

Guidelines for Specifiers and Contractors

Fornecer um comentário sobre a especificação, dando uma explicação dos requisitos.

■ Norwegian Concrete Association (NB)

Publication no. 7 - Sprayed Concrete for Rock Support

A Publicação n° 7 destina-se a ser um documento de apoio relacionado às Normas Europeias para o mercado norueguês de concreto projetado. Estão compilados todos os aspectos de especificação do produto, materiais, aplicação e testes de concreto projetado.

■ American Concrete Institute (ACI), Committee 506

ACI 506.2-13(18), Specification for Shotcrete

Especificação dos requisitos de construção para aplicação de concreto projetado:

- Part 1: General. Definitions, Standards, Testing.
- Part 2: Products. Materials, shotcrete properties, proportioning, batching and delivery
- Part 3: Execution. Substrate preparation, application, finish, curing, repair

ACI 506R-16, Guide to Shotcrete

- Part 1: All aspects of shotcrete design and construction, on materials and testing.
- Part 2: Specification for Materials, Proportioning, and Application of Shotcrete.
- Part 3: Execution of shotcrete - surface preparation, application, finishing, curing.
- Part 4: All kind of equipment for dry and wet mix application.
- Part 5: Crew organization, qualification and communication.
- Part 6: Shotcrete sustainability, construction efficiency.

■ Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (ABECE), Comitê 303, CT 4

- Prática recomendada: Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras.
- Prática recomendada: Macrofibras poliméricas para concreto destinado a aplicações estruturais
- Definições, especificações e conformidade.
- Prática recomendada: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras.
- Prática recomendada: Macrofibras de vidro álcali-resistentes (AR) para concreto destinado a aplicações estruturais - Definições, especificações e conformidade.

11 ÍNDICE

A

| | |
|--------------------------------------|------------|
| Absorção de água | 53 |
| Absorção de energia | 27, 48, 97 |
| Acelerador | 38 |
| Acelerador AF (modo químico de ação) | 40 |
| Acelerador alcalino | 43, 44 |
| Acelerador livre de álcalis | 38, 42, 44 |
| Aderência | 25, 44, 77 |
| Aderência ao substrato | 25 |
| Adições minerais | 33 |
| Adições não reativas | 36 |
| Adições reativas | 33 |
| Aditivos para concreto projetado | 36, 44 |
| Agregados | 29, 56 |
| Água de amassamento | 32, 53, 61 |
| Alcalinidade | 39 |
| Aplicação | 75, 78 |
| Areia | 30 |
| Argilas calcinadas | 34 |

B

| | |
|--|--------|
| Balanco de materiais, concreto projetado via seca | 65 |
| Balanco de materiais, concreto projetado via úmida | 54 |
| Bombas de concreto | 70 |
| Bomba de pistão | 70 |
| Bombeabilidade | 23, 60 |

C

| | |
|--|--------|
| Campos de aplicação | 13 |
| Capacidade de projeção | 24 |
| Certificação de mangoteiro | 91 |
| Cimento | 30 |
| Cinza volante | 34 |
| Classes de resistência (J1 - J3) | 93 |
| Classificação do concreto projetado por material | 51 |
| Controle de qualidade no local | 92 |
| Curva de Fuller | 56 |
| Curva granulométrica | 56 |
| Classificação do concreto projetado por processo | 67 |
| Coesão | 59 |
| Compactação | 26 |
| Componentes do concreto projetado | 29 |
| Concreto projetado impermeável | 18, 27 |
| Concreto projetado semi úmido | 66 |
| Concreto projetado via seca | 64 |
| Concreto projetado via úmida | 52 |
| Configuração de bico de projeção | 82 |
| Cálculo de espaços do material, úmido | 54 |
| Constituintes do concreto projetado | 29 |
| Contaminação água de amassamento | 33, 90 |

| | | | | | | | |
|--|------------|---|--------|---|----------------|--------------------------------------|--------|
| D | | I | | | | | |
| Definição de concreto projetado por material | 51 | Impacto da relação a/c ao longo da aceleração | 42 | Penetrômetro | 95 | Resistência contra ataques químicos | 27 |
| Definição de concreto projetado por processo | 67 | Impacto da relação a/c sobre conc. projetado | 41 | Plasticidade | 31 | Retardador | 38 |
| Densidade de empacotamento | 56 | Impacto da temperatura sobre conc. projetado | 86 | Poeira e reflexão | 24, 54, 85 | Revestimento | 16 |
| Desempenho de concreto projetado | 93 | L | | Preenchimento do espaço de agregados | 56 | S | |
| Difração de raios-X | 98 | Laminação (lentes) | 86 | Preparação do Substrato | 77 | Saturado superfície seca | 53 |
| Distribuição granulométrica | 56 | Lixiviação | 28 | Processo (definição de conc. projetado) | 67 | Seco ao forno | 53 |
| Desempenho de concreto projetado | 93 | Lubrificação, interna | 59 | Processo fluxo aerado | 71 | Segurança | 75 |
| Dosagem (seca) | 64 | Lubrificação, linhas de bombeamento | 59 | Processo fluxo denso | 69 | Sílica ativa | 34 |
| Dosagem (úmida) | 52 | | | Propriedades da mistura de concreto | 63 | Solução problemas de desempenho | 101 |
| Durabilidade | 27, 34 | | | Propriedades do concreto fresco | 37, 38, 45, 63 | Sombras de projeção (telas) | 86 |
| | | | | Pulsment | 98 | SSMA em concreto projetado | 75 |
| E | | M | | Q | | SSS | 53 |
| Efeito dos aditivos | 44 | Macro fibras | 46 | Qualidade de aplicação | 91 | Suavidade | 37 |
| Efeito dos constituintes | 62, 80 | Máquina à rotor | 73 | Qualidade de materiais | 89 | Superplastificante | 37 |
| Equipamento, processo fluxo denso | 70 | Materiais (componentes do concreto projetado) | 29 | | | Sustentabilidade | 21 |
| Equipamento, processo fluxo aerado | 73 | Materiais para concreto projetado (definição de concreto projetado) | 51 | R | | | |
| Escória | 34 | Medidas para melhoria de dosagem (úmida) | 62 | Reação (conc. Projetado acelerado AF) | 40 | T | |
| Estabilização da escavação | 13 | Melhoria das propriedades do concreto projetado | 62 | Reação de aceleração | 40 | Tecnologias de concreto projetado | 51, 67 |
| Éter policarboxilato (PCE) | 37 | Membranas | 16 | Recomendações de parâmetros para concreto projetado | 80 | Testes de controle de qualidade | 92, 97 |
| Excesso de água | 61 | Método de penetração da agulha | 95 | Redutor de água | 37 | Tempo de trabalhabilidade | 23 |
| Extração de testemunhos | 96 | Micro calcita | 35 | Reflexão e poeira | 24, 54, 85 | Teor de finos, úmido | 58 |
| | | Monitoramento de concreto projetado | 94 | Regra de van't Hoff | 41 | Teor de umidade (seco) | 64, 66 |
| F | | N | | Regras de projeção (ângulo, distância) | 78 | Teste de penetração de pinos (Hilti) | 96 |
| Fibras | 46 | Normas | 103 | Relação a/c | 61 | Teste em laboratório | 97 |
| Filler | 35, 36 | O | | Relação a/l | 61 | Teste Hilti | 96 |
| Fluidez | 23 | Otimização de dosagem | 62 | Requisitos da mistura de concreto | 22 | Teste MiniShot | 98 |
| | | P | | Requisitos de concreto projetado | 21 | Testemunhos | 96 |
| G | | Pega/enrijecimento | 26, 94 | Requisitos conc. projetado (aplicação) | 24 | Teste na obra | 92 |
| Gerenciamento de qualidade | 89 | pH de aceleradores | 39 | Requisitos conc. projetado (endurecido) | 26 | U | |
| Graduação | 56 | | | Requisitos conc. projetado (mistura) | 22 | Umidade (agregados) | 53 |
| Guia de solução de problemas | 101 | | | Resistência à compressão | 26, 93, 97 | Umidade superficial | 53 |
| Guias | 105 | | | Resistência à compressão inicial | 26, 95 | Usos do concreto projetado | 13 |
| Gunita | 64 | | | Resistência à compressão final | 26, 94 | V | |
| H | | | | Resistência ao ciclo gelo/degelo | 28 | Viscosidade | 23 |
| Hidratação | 31, 40, 61 | | | Resistência ao fogo | 28, 46 | Volume de Pasta (úmida) | 58 |

PARA MAIS INFORMAÇÕES SOBRE CONCRETO PROJETADO



NÓS SOMOS SIKA

A Sika é uma empresa especializada em produtos químicos, que ocupa uma posição de liderança no desenvolvimento e na produção de sistemas e produtos de fixação, vedação, amortecimento, reforço e proteção no setor de edifícios e na indústria de veículos automotores. As linhas de produtos da Sika possuem aditivos para concreto, argamassas, selantes e adesivos, sistemas de reforços estruturais, pisos industriais, além de sistemas de impermeabilização e coberturas.

Nossas Condições de Vendas Gerais mais recentes se aplicam.
Consulte a Folha de Dados dos Produtos local mais recente antes do uso e processamento.



SIKA SERVICES AG
Tüffenwies 16
CH-8048 Zürich
Suíça

Contato
Telefone +41 58 436 40 40
Fax +41 58 436 41 50
www.sika.com.br

BUILDING TRUST

