

Silica Fume

User's Manual

Segunda edição



Foto da capa: A ponte New Goethals, atravessando o estreito de Arthur Kill entre Elizabeth, Nova Jersey e Staten Island, Nova York. A sílica ativa foi usada para produzir 397 vigas de concreto de alta resistência. Cada viga tinha 53,6 m de comprimento, 1,1 m de largura e pesava 100 toneladas.

Silica Fume User's Manual

Segunda edição

ISENÇÕES DE RESPONSABILIDADE

A edição original do *Manual do Usuário do Silica Fume* foi produzida sob o Acordo Cooperativo DTFH61-99-X-00063 entre a Federal Highway Administration e a Silica Fume Association como FHWA-IF-05-016. Esse documento foi divulgado sob o patrocínio do Departamento de Transportes no interesse da troca de informações. O custo de produção da edição original foi financiado com recursos federais e participação nos custos da indústria.

As informações e os dados relatados nesta segunda edição atualizada são suportados pelas informações do documento original, mas são produzidos exclusivamente pela Silica Fume Association para fornecer informações técnicas e práticas para usuários de sílica ativa que se acumularam desde a publicação do manual original. O conteúdo é desenvolvido exclusivamente pela Silica Fume Association e não representa as opiniões oficiais da Federal Highway Administration. Este documento não constitui um padrão, especificação ou regulamento, e o governo dos Estados Unidos, o Departamento de Transporte e a Administração Federal de Rodovias não assumem qualquer responsabilidade por seu conteúdo ou uso.

CONTEÚDO

Introdução	vii
Convenções usadas neste manual	ix
Tabela de conversão.....	x
Dedicação e alguma história de sílica-fumaça.....	XI

CAPÍTULO 1. O QUE É SÍLICA FUME? / 1

1.1 Descrição	2
1.2 Produção.....	4

CAPÍTULO 2. PROPRIEDADES E REAÇÕES DA SÍLICA FUME NO CONCRETO / 6

2.1 Propriedades Químicas	7
2.2 Propriedades Físicas.....	8
2.3 Tipos de produto.....	10
2.4 Reações no Concreto	12
2.5 Comparação com Outros Materiais Cimentícios Suplementares	14

CAPÍTULO 3. POR QUE A SÍLICA FUMA É UTILIZADA NO CONCRETO? / 15

3.1 Sílica Fumo e Concreto Fresco	16
3.1.1 Maior Coesão.....	17
3.1.2 Sangramento reduzido	17
3.2 Sílica Fume e Concreto Endurecido.....	20
3.2.1 Propriedades Mecânicas Aprimoradas	21
3.2.2 Durabilidade Aprimorada.....	27
3.3 Sílica Fumosa e Construtibilidade	35
3.4 Sílica Fume e Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC)	40
3.5 Sílica Fumo e Sustentabilidade	46

CONTEÚDO

CAPÍTULO 4. ORIENTAÇÃO ACI, ESPECIFICAÇÕES PADRÃO E ESPECIFICAÇÃO DE CONCRETO DE SÍLICA-FUME / 47

4.1 Orientação ACI.....	48
4.1.1 Código de Construção ACI para Concreto Estrutural.....	48
4.1.2 Orientação do Comitê	48
4.2 Especificações padrão para sílica ativa	51
4.2.1 ASTM C1240	52
4.2.2 AASHTO M 307.....	55
4.2.3 EN 13263	57
4.3 Especificação de sílica ativa e concreto de sílica ativa	60
4.4 Material de referência de sílica ativa	61

CAPÍTULO 5. DOSAGEM DE CONCRETO DE SÍLICA-FUME / 62

5.1 Considerações Básicas	63
5.2 Requisitos do Projeto.....	66
5.3 Considerações de construção.....	67
5.4 Procedimento de Proporção	70
5.4.1 Regras Gerais	70
5.4.2 Procedimento passo a passo	72
5.5 Ajustando a Mistura.....	84
5.6 Exemplos de dosagem de mistura.....	85
5.6.1 Exemplo 1 – Plataforma da ponte	85
5.6.2 Exemplo 2 – Estrutura de estacionamento moldada no local	88
5.6.3 Exemplo 3 – Pilares de Concreto de Alta Resistência	91
5.7 Considerações Adicionais para Dosagem de Mistura.....	94
5.7.1 Embalagem de Partículas.....	94
5.7.2 Modificando a Viscosidade	94
5.7.3 Abordagem Estatística para Misturas Complexas	95

CONTEÚDO

CAPÍTULO 6. PRODUÇÃO DE CONCRETO DE SÍLICA FUMA: MANUSEIO, DOSAGEM E MISTURA / 96

6.1 Considerações Gerais.....	97
6.2 Fumo de Sílica Densificada em Massa.....	101
6.2.1 Remessa	101
6.2.2 Requisitos de armazenamento	102
6.2.3 Descarga.....	106
6.2.4 Lote	108
6.2.5 Misturando	109
6.2.6 Outras Preocupações	111
6.3 Fumaça de sílica densificada ensacada.....	112
6.3.1 Remessa	113
6.3.2 Requisitos de armazenamento	114
6.3.3 Descarga.....	114
6.3.4 Lote	114
6.3.5 Misturando	116
6.3.6 Outras Preocupações	117

CAPÍTULO 7. COLOCAÇÃO, CONSOLIDAÇÃO, ACABAMENTO E CURA DE CONCRETO DE SÍLICA FUMA / 118

7.1 Considerações Gerais.....	120
7.1.1 Coordenação	120
7.1.2 Considerações de pré-colocação.....	121
7.1.3 Concreto Formado de Sílica Fumada.....	122
7.2 Posicionamento e Consolidação	123
7.3 Secagem do Concreto	124
7.3.1 Sangramento	124
7.3.2 Secagem da Superfície	124
7.3.3 Resultados da Secagem.....	127
7.3.4 Proteger contra o ressecamento.....	130

CONTEÚDO

7.4 Terminando os decks da ponte.....	134
7.4.1 Determinar o Grau de Acabamento Necessário	134
7.4.2 Realizar uma conferência de pré-colocação	134
7.4.3 Conduza uma colocação de teste.....	134
7.4.4 Preparação de Superfície para Overlays	136
7.4.5 Aplicar revestimento de cola	137
7.4.6 Colocar o Concreto	138
7.4.7 Consolidação e Acabamento do Concreto.....	139
7.4.8 Texturizar a Superfície.....	140
7.4.9 Proteger e Curar a Superfície.....	142
7.5 Acabamento de estruturas de estacionamento e outros trabalhos planos	145
7.5.1 Determinar o Grau de Acabamento Necessário.....	147
7.5.2 Realizar uma conferência de pré-colocação	147
7.5.3 Realizar uma Colocação de teste.....	148
7.5.4 Colocação e Consolidação do Concreto	149
7.5.5 Executar a flutuação de alta inicial	150
7.5.6 Permitir que o concreto termine de sangrar e ganhe resistência.	151
7.5.7 Executar a flutuação final e alisamento	151
7.5.8 Aplicar textura de superfície.....	152
7.5.9 Aplicar Cura Intermediária/Proteção de Secagem.....	154
7.5.10 Aplicar Cura Final.....	154
7.6 Cura.....	156
7.6.1 Recomendações da Associação de Fumo de Silica	156
7.6.2 A Cura Afeta a Durabilidade da Superfície	157
7.6.3 Cura Versus Proteção	157
7.6.4 Cura e Rachadura.....	158
7.6.5 Proteção de Inverno.....	158
7.7 Concreto pré-moldado	159
7.8 Preocupações Diversas.....	160
7.8.1 Corte de Juntas	160
7.8.2 Protensão de Cordoalhas Pós-tensionadas.....	160
7.8.3 Pisos com espátula dura.....	160
7.8.4 Pintura Após a Cura.....	161

CONTEÚDO

CAPÍTULO 8. SÍLICA FUMA E SUSTENTABILIDADE / 162

8.1 Pegada de Carbono (CO2) da Sílica Fumegante	163
8.2 Componentes Minerais Recuperados (RMC).....	164
8.3 Vida Útil Prolongada.....	165
8.4 Características de Engenharia Aprimoradas.....	166
8.5 Concreto de Baixo Carbono	167

CAPÍTULO 9. QUESTÕES DE SAÚDE DE FUMOS DE SÍLICA / 169

9.1 Considerações Gerais e Recomendações.....	170
9.2 Folha de Dados de Segurança de Fumo de Sílica	172
9.3 Etiqueta de Advertência do Saco de Sílica Fumosa.....	173

CAPÍTULO 10. REFERÊNCIAS / 174

10.1 Instituto Americano do Concreto.....	175
10.2 ASTM Internacional	175
10.3 Associação Americana de Funcionários de Rodovias e Transportes Estaduais (AASHTO)....	177
10.4 Comitê Europeu de Normalização (CEN)	178
10.5 Referências Citadas	179

APÊNDICE 1. EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO EM UNIDADES POLEGADAS-LIBRA / 181

A.1 Exemplos de proporção em unidades de polegada-libra.....	182 A.1
Exemplo 1 – Convés da Ponte	182 A.2
Exemplo 2 – Estrutura de estacionamento moldada no local	
185 A.3 Exemplo 3 – Pilares de Concreto de Alta Resistência	188

APÊNDICE 2. FICHA DE DADOS DE SEGURANÇA / 194

A.2 Ficha de Dados de Segurança	195
---------------------------------------	-----

INTRODUÇÃO

Este manual destina-se a fornecer informações práticas para indivíduos que trabalham com sílica ativa e concreto de sílica ativa. Diferentes capítulos do Manual podem ser de interesse para especificadores de concreto, produtores de concreto, empreiteiros de concreto ou inspetores de concreto. O Manual está organizado da seguinte forma:

n Os capítulos 1 e 2 fornecem informações básicas explicando o que é a sílica ativa e como ela reage em concreto.

ÿ O Capítulo 3 descreve os principais usos da sílica ativa no concreto. **n O**

Capítulo 4 revisa a orientação da ACI e as especificações padrão para sílica ativa. **n O**

Capítulo 5 apresenta informações detalhadas sobre dosagem de concreto contendo sílica ativa para diferentes aplicações.

n O Capítulo 6 apresenta recomendações para trabalhar com sílica ativa em uma fábrica de concreto.

n O Capítulo 7 apresenta recomendações para colocação e acabamento de concreto de sílica ativa em tabuleiros de pontes e outros trabalhos planos.

ÿ O Capítulo 8 discute o papel da sílica ativa em tornar o concreto mais sustentável. **ÿ O**

Capítulo 9 discute questões de saúde associadas ao trabalho com sílica ativa e apresenta recomendações para proteção pessoal.

ÿ O Capítulo 10 é uma coleção de referências dos outros capítulos.

O conteúdo deste relatório reflete a opinião da Silica Fume Association (SFA), que é responsável pelos fatos e pela veracidade dos dados aqui apresentados.

A Silica Fume Association foi formada em 1998 para servir como uma voz para os produtores de sílica ativa. Visite o site da SFA (www.silicafume.org) para obter informações adicionais.

Esta primeira edição deste manual foi preparada pelo Dr. Terence C. Holland com a cooperação dos membros da Silica Fume Association. O Dr. Holland também preparou a segunda edição com a ajuda de Eckart Bühler e Robert Lewis, dois especialistas de longa data da indústria no uso de sílica ativa. Perguntas ou comentários sobre este manual devem ser endereçados à seção de solicitação de informações técnicas do site da SFA (www.silicafume.org).

Este documento também pode ser baixado do site da SFA.

Segunda edição, primeira impressão, junho de 2022

CONVENÇÕES USADAS EM ESTE MANUAL

- 1. Teor de água.** Ao longo deste manual, a abreviação w/cm é usada para water-to proporção de materiais cimentícios. Este valor é a massa da água dividida pela soma das massas de todos os materiais cimentícios. Em alguns casos, exceto neste manual, este valor é referido como a relação água-aglutinante.
- 2. Padrões.** O título de um padrão é mostrado na primeira vez que o padrão é mencionado em o texto. Todas as outras referências a esse padrão são feitas simplesmente usando a designação numérica para o padrão, como ASTM C1240. Se houver qualquer dúvida sobre o título completo de um padrão, consulte as listas de referência no Capítulo 10.
- 3. Tabela de conversão.** Este documento foi preparado usando unidades do SI. Em um pequeno número de casos, unidades de polegada-libra são usadas para auxiliar os usuários. Uma tabela de conversão de SI para unidades de libra em polegada segue esta seção. A tabela de proporções de mistura de concreto e os exemplos de dosagem mostrados no Capítulo 5 usando unidades SI são repetidos no Apêndice 1 usando unidades de polegada-libra.
- 4. Densidade, peso unitário e gravidade específica.** A densidade de um material, às vezes referida como peso unitário, é a massa por unidade de volume. Em unidades SI, a densidade da água é 1000 kg/m³ (1Mg/m³). Este valor é usado ao dosar misturas de concreto. A gravidade específica é um valor sem unidade que mostra a relação entre a densidade de um material em comparação com a densidade da água. A gravidade específica de um material é a mesma em unidades SI ou polegadas-libra. Em unidades do SI, a gravidade específica pode ser rapidamente derivada da densidade. Por exemplo, a densidade do cimento portland é 3150 kg/m³ e o peso específico é 3,15.
- 5. Associação de sílica ativa.** Este manual é produzido pela Silica Fume Association. Para evitar repetições, esse nome é abreviado como SFA ao longo do manual.
- 6. Abreviações de organizações.** As seguintes abreviaturas para organizações são usadas em este manual:

ACI – Instituto Americano do Concreto

ASTM – ASTM International (anteriormente a Sociedade Americana de Testes e Materiais)

AASHTO – Associação Americana de Oficiais Estaduais de Rodovias e Transportes **CEN** –

Comitê Europeu de Padronização **DOT** – Departamento

de Transportes. Este é o termo usual usado para uma organização estadual responsável por estradas e pontes nos Estados Unidos.

SI* (MODERN METRIC) CONVERSION FACTORS**APPROXIMATE CONVERSIONS TO SI UNITS**

Symbol	When You Know	Multiply By	To Find	Symbol
LENGTH				
in	inches	25.4	millimeters	mm
ft	feet	0.305	meters	m
yd	yards	0.914	meters	m
mi	miles	1.61	kilometers	km
AREA				
in ²	square inches	645.2	square millimeters	mm ²
ft ²	square feet	0.093	square meters	m ²
yd ²	square yard	0.836	square meters	m ²
ac	acres	0.405	hectares	ha
mi ²	square miles	2.59	square kilometers	km ²
VOLUME				
fl oz	fluid ounces	29.57	milliliters	mL
gal	gallons	3.785	liters	L
ft ³	cubic feet	0.028	cubic meters	m ³
yd ³	cubic yards	0.765	cubic meters	m ³
NOTE: volumes greater than 1000 L shall be shown in m ³				
MASS				
oz	ounces	28.35	grams	g
lb	pounds	0.454	kilograms	kg
T	short tons (2000 lb)	0.907	megagrams (or "metric ton")	Mg (or "t")
TEMPERATURE (exact degrees)				
°F	Fahrenheit	5 (F-32)/9 or (F-32)/1.8	Celsius	°C
ILLUMINATION				
fc	foot-candles	10.76	lux	lx
fl	foot-Lamberts	3.426	candela/m ²	cd/m ²
FORCE and PRESSURE or STRESS				
lbf	poundforce	4.45	newtons	N
lbf/in ²	poundforce per square inch	6.89	kilopascals	kPa

APPROXIMATE CONVERSIONS FROM SI UNITS

Symbol	When You Know	Multiply By	To Find	Symbol
LENGTH				
mm	millimeters	0.039	inches	in
m	meters	3.28	feet	ft
m	meters	1.09	yards	yd
km	kilometers	0.621	miles	mi
AREA				
mm ²	square millimeters	0.0016	square inches	in ²
m ²	square meters	10.764	square feet	ft ²
m ²	square meters	1.195	square yards	yd ²
ha	hectares	2.47	acres	ac
km ²	square kilometers	0.386	square miles	mi ²
VOLUME				
mL	milliliters	0.034	fluid ounces	fl oz
L	liters	0.264	gallons	gal
m ³	cubic meters	35.314	cubic feet	ft ³
m ³	cubic meters	1.307	cubic yards	yd ³
MASS				
g	grams	0.035	ounces	oz
kg	kilograms	2.202	pounds	lb
Mg (or "t")	megagrams (or "metric ton")	1.103	short tons (2000 lb)	T
TEMPERATURE (exact degrees)				
°C	Celsius	1.8C+32	Fahrenheit	°F
ILLUMINATION				
lx	lux	0.0929	foot-candles	fc
cd/m ²	candela/m ²	0.2919	foot-Lamberts	fl
FORCE and PRESSURE or STRESS				
N	newtons	0.225	poundforce	lbf
kPa	kilopascals	0.145	poundforce per square inch	lbf/in ²

*SI is the symbol for the International System of Units. Appropriate rounding should be made to comply with Section 4 of ASTM E380. (Revised March 2003)

DEDICAÇÃO E ALGUMAS HISTÓRIA DE SÍLICA-FUMA

O uso bem-sucedido da sílica ativa no concreto foi resultado das contribuições de duas empresas e de um grande número de indivíduos da indústria do concreto. Esta segunda edição é dedicada a todos que contribuíram para o uso da sílica ativa.

A sílica ativa foi introduzida na indústria de concreto dos EUA essencialmente simultaneamente por duas organizações:

- n A Elborg Technology, uma joint venture da Elkem Metals e da Aalborg Portland, começou a promover a sílica ativa na década de 1970. Quando Aalborg deixou a joint venture, esta empresa se tornou a Elkem Chemicals. Hoje, esta organização é conhecida como Elkem Silicon Products.
- n Norcem, uma joint venture entre John Wolsiefer, Sr. e Scancem (um fornecedor norueguês de cimento), também começou a promover a sílica ativa na mesma época. Esta organização tornou-se Norchem Concrete Products e posteriormente parte do grupo Ferroglobe, nome pelo qual é conhecida no momento da preparação desta edição.

A seguir estão alguns dos indivíduos que desempenharam um papel importante (se um leitor estiver ciente de outros indivíduos que devem ser reconhecidos, informe o SFA):

Pierre Claude Aïtcin, Universidade de Sherbrooke
Eckart Bühler, Master Builders/Norchem/Ferroglobe
Magne Dåstøl, Elkem
Per Fidjestøl, Elkem
Odd Gjørnv, Instituto Norueguês de Tecnologia
Terry Holland, Elborg/Elkem Chemicals/consultor independente
Doug Hooton, Universidade de Toronto
Tony Kojundic, Elkem Chemicals
Robert Lewis, Elkem/Ferroglobe
Mark Luther, Elborg/Elkem Chemicals
Mohan Malhotra, CANMET
Erik Sellevold, SINTEF
John Wolsiefer, Sr., Norcem/Norchem

DEDICAÇÃO E ALGUMA HISTÓRIA DE SÍLICA FUME

Por fim, um pouco da história do projeto:

- n **1946** – Primeira menção do uso de sílica ativa em um material cimentício - Patente US 2.410.954 por JW Sharp.
- n **1950** – Primeiras experiências sobre o uso de sílica ativa em concreto no Instituto Norueguês de Tecnologia.
- n **1978** – O padrão norueguês permite o uso de até oito por cento de sílica ativa no concreto como desde que w/cm seja menor que 0,70.
- n **Início dos anos 80** – Muitos projetos onde o concreto de sílica ativa foi colocado em garagens de estacionamento (proteção contra saís de degelo) e aplicações de concreto resistente a produtos químicos.
- n **1981** – Buck e Burkes (USACE) publicaram o primeiro artigo técnico na América do Norte sobre sílica ativa mostrando maior resistência ao ASR e ao ataque por sulfato.
- n **1983** – O primeiro projeto de sílica ativa publicamente licitado nos Estados Unidos foi feito pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA. Este projeto foi o reparo de uma laje da bacia de dissipação na Represa Kinzua, localizada na Pensilvânia. O projeto é notável porque o concreto tinha uma resistência à compressão especificada de 86 MPa aos 28 dias, que era de longe a maior resistência especificada nos EUA até então. Este projeto é descrito no Capítulo 3 deste manual.
- n **1983** –Primeira Conferência Internacional sobre Cinzas Volantes, Sílica Fume, Escória e outros Subprodutos Minerais em Concreto. Esta conferência foi realizada em Montreal e foi patrocinada pela CANMET e ACI. Os anais foram publicados como ACI SP-79.
- n **1984** – Concreto de sílica ativa com resistência à compressão de 90 MPa aos 91 dias foi colocado em uma coluna experimental em um arranha-céu em Montreal.
- n **1989** – Primeiras estruturas de arranha-céus a usar concreto de alta resistência de sílica ativa na cidade de Nova York. n
- Final dos anos 1980** – vários DOTs no cinturão de ferrugem e no nordeste dos EUA começaram a especificar sílica ativa betão para reabilitação de tabuleiros de pontes
- n **década de 1990** – Uso de misturas ternárias de cimento portland, cinzas volantes e sílica ativa na ponte Storebaelt na Dinamarca e cimento portland, cimento de escória e sílica ativa na ponte Tsing Ma em Hong Kong.
- n **1990** – Uma das primeiras coberturas de pontes de concreto de sílica ativa foi colocada pelo Departamento de Transportes de Ohio. Este projeto foi uma ponte em Waterford, OH, na Michelle Ave/State Route 339 cruzando o rio Muskingum.
- n **1997** – Concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) usado para ponte de pedestres na Sherbrook University, Quebec, Canadá.
- n **2006** – Primeiro uso de UHPC em uma ponte nos EUA. Três vigas UHPC pré-moldadas de 33,5 m de comprimento foram usadas para a ponte Mars Hill em Iowa.
- n **2016** – Primeiro uso de UHPC nos EUA para uma cobertura de tabuleiro de ponte em Buchanan County, Iowa.

1 O QUE É SÍLICA FUME?

A sílica ativa é um material altamente reativo que é usado para aumentar o propriedades do concreto. Dependendo da aplicação, é normalmente usado entre 2 e 20 por cento em massa de material cimentício. Isso é um subproduto da produção de certos metais em eletricidade fornos de arco.

Este capítulo explica o que é a sílica ativa e como ela é produzido.

1.1	Descrição.....	2
1.2	Produção	4

1.1 DESCRIÇÃO

O American Concrete Institute (ACI) define sílica ativa como “sílica não cristalina muito fina produzida em fornos de arco elétrico como subproduto da produção de silício elementar ou ligas contendo silício” (ACI Concrete Terminology).

Geralmente é um pó cinza, um pouco semelhante ao cimento portland ou algumas cinzas volantes. A Figura 1.1 mostra uma típica sílica ativa como ela aparece depois de ser coletada de um forno.



FIGURA 1.1. Sílica ativa como produzida. É assim que o material fica depois de coletado.

A sílica ativa é geralmente categorizada como um material cimentício suplementar. Este termo refere-se a materiais que são usados no concreto além do cimento portland. Esses materiais podem apresentar as seguintes propriedades:

n Pozolânico — não ganha força quando misturado com água. Os exemplos incluem sílica ativa que atende aos requisitos de ASTM C1240, *Especificação padrão para sílica ativa usada em misturas de cimento* e cinzas volantes com baixo teor de cálcio que atendem aos requisitos de ASTM C618, *Especificação padrão para cinzas de carvão e pozolana natural bruta ou calcinada para uso em concreto*, Classe F.

1.1 DESCRIÇÃO

n Cimentício — ganha resistência quando misturado com água. Exemplos incluem cimento de escória que atende aos requisitos da ASTM C989, *Especificação padrão para cimento de escória para uso em concreto e argamassas*, ou cinza volante com alto teor de cálcio que atende aos requisitos da ASTM C618, Classe C.

n Pozolânico e cimentício — uma combinação de ambas as propriedades. Exemplos incluem algumas moscas cinzas.

A sílica ativa é frequentemente referida por outros nomes. Este manual usará o termo sílica ativa, conforme adotado pelo American Concrete Institute. Aqui estão alguns dos outros nomes para sílica ativa:

n Sílica condensada

n Microssílica

Existem vários materiais que são fisicamente e quimicamente bastante semelhantes à sílica ativa.

Esses materiais podem ou não ser subprodutos. Alguns desses materiais podem funcionar bem em concreto; no entanto, seu custo geralmente proíbe tal uso.

n Sílica precipitada n

Sílica pirogênica

n Gel de sílica

n Sílica coloidal

n Farinha de sílica e pó de sílica — cuidado: esses materiais são uma forma cristalina de sílica que não funcionará como sílica ativa em concreto. Devido à sua estrutura cristalina, esses produtos também podem representar riscos à saúde.

1.2 PRODUÇÃO

A sílica ativa é um subproduto da produção de silício metálico ou ligas de ferro silício em fundições que usam fornos de arco elétrico. Esses metais são usados em muitas aplicações industriais, incluindo a produção de alumínio e aço, fabricação de chips de computador e produção de silicões, que são amplamente utilizados em lubrificantes e selantes. Embora sejam materiais muito valiosos, o subproduto da sílica ativa é mais importante para a indústria do concreto.

A Figura 1.2 mostra uma fundição nos dias anteriores à captura de sílica ativa para uso em concreto e outras aplicações. A “fumaça” que sai da usina é a sílica ativa. Hoje, a maioria das diretrizes ambientais proíbe a liberação de sílica ativa na atmosfera. Um esquema da produção de sílica ativa é mostrado na Figura 1.3 e um esquema de uma fundição é mostrado na Figura 1.4. A sílica ativa é coletada em filtros muito grandes no filtro de mangas e então disponibilizada para uso em concreto diretamente ou após processamento adicional conforme descrito no Capítulo 2.



FIGURA 1.2. Fundição antes da instalação do equipamento para coleta de sílica ativa. A “fumaça” é fumaça de sílica sendo liberada para a atmosfera.

1.2 PRODUÇÃO

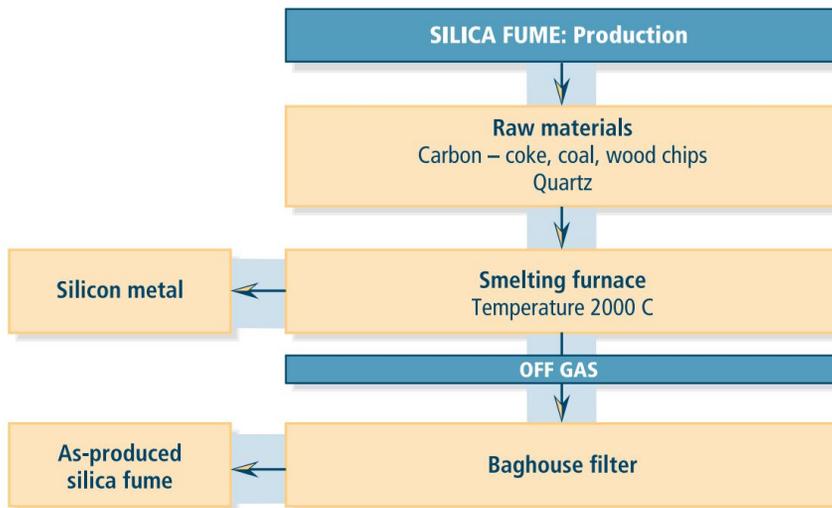


FIGURA 1.3. Esquema da produção de sílica ativa.

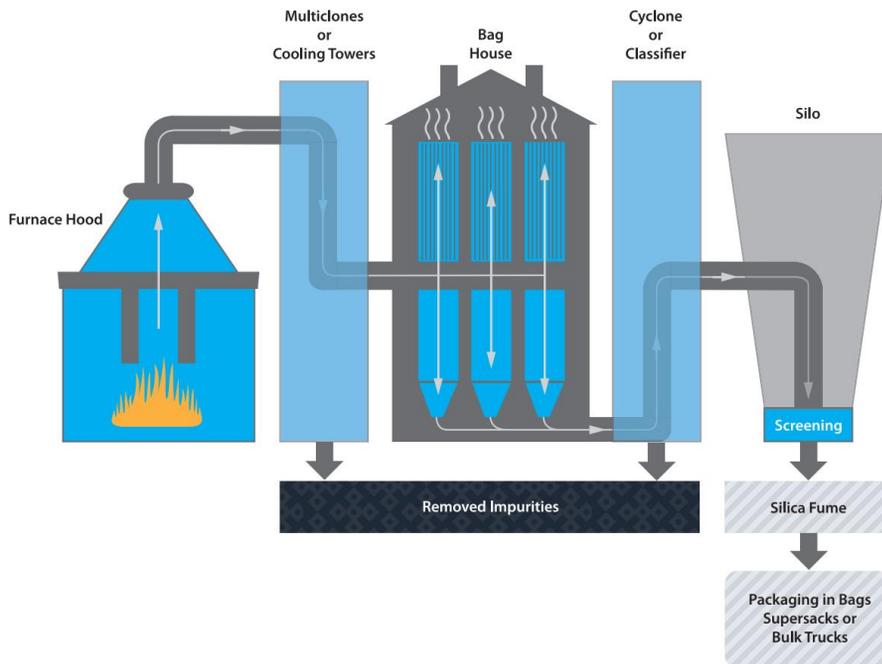


FIGURA 1.4. Esquema de uma fundição e sistema de processamento e limpeza de sílica ativa. Equipamentos e layouts específicos podem variar nas fábricas reais.

2

PROPRIEDADES DE SÍLICA FUME E REAÇÕES EM CONCRETO

As propriedades físicas e químicas da sílica ativa afetam as propriedades do concreto. Essas propriedades são descritas neste capítulo.

Além disso, os produtos de sílica ativa disponíveis e como a sílica ativa contribui para as melhorias em fresco e endurecido concreto são discutidos.

Finalmente, a sílica ativa é comparada a outros materiais cimentícios suplementares.

2.1 Propriedades Químicas.....	7
2.2 Propriedades Físicas	8
2.3 Tipos de produtos	10
2.4 Reações no Concreto.....	12
2.5 Comparação com Outros Suplementos Materiais Cimentícios.....	14

2.1 PROPRIEDADES QUÍMICAS

As propriedades químicas primárias da sílica ativa são mostradas na Tabela 2.1. A seguir, é apresentada uma discussão sobre cada uma dessas propriedades. As principais propriedades químicas estão incluídas nas especificações padrão para sílica ativa, conforme discutido no Capítulo 4.

TABELA 2.1

PROPRIEDADES QUÍMICAS DA SÍLICA FUME
n Amorfo
n Dióxido de silício > 85 por cento
n Oligoelementos dependendo do tipo de fumaça

n Amorfo. Este termo significa simplesmente que a sílica ativa não é um material cristalino. A o material cristalino não se dissolverá no concreto, o que deve ocorrer antes que o material possa reagir. Existe um material cristalino no concreto quimicamente semelhante à sílica ativa. Esse material é areia. Embora a areia seja essencialmente dióxido de silício (SiO_2), ela não reage devido à sua natureza cristalina.

n Dióxido de silício (SiO_2). Este é o material reativo na sílica ativa. Como a sílica ativa reage em concreto é discutido na Seção 2.4.

n Oligoelementos. Pode haver materiais adicionais na sílica ativa com base no metal sendo produzido na fundição da qual a fumaça foi recuperada. Normalmente, esses materiais não têm impacto no desempenho da sílica ativa no concreto. As especificações padrão podem colocar limites em alguns dos materiais desta categoria, conforme discutido no Capítulo 4.

2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades físicas primárias da sílica ativa são mostradas na Tabela 2.2. A seguir, é apresentada uma discussão sobre cada uma dessas propriedades. As principais propriedades físicas estão incluídas nas especificações padrão para sílica ativa, conforme discutido no Capítulo 4.

TABELA 2.2

PROPRIEDADES FÍSICAS DA SÍLICA FUME	
Tamanho da partícula (típico): < 1 µm	
Densidade a	
granel: (conforme	200 a 350 kg/m ³ 450
produzido): (densificado):	a 700 kg/m ³
Gravidade Específica:	2.2
Superfície específica:	15.000 a 30.000 m ² /kg

n Tamanho da partícula. As partículas de sílica ativa são extremamente pequenas, com mais de 95% de sendo as partículas menores que 1 µm (um micrômetro). O tamanho da partícula é significativo para as contribuições físicas e químicas (discutidas abaixo) da sílica ativa no concreto. Uma fotomicrografia de grãos de cimento portland e partículas de sílica ativa é mostrada na Figura 2.1.

n Densidade aparente. Este é outro termo para peso unitário. A densidade aparente da fumaça produzida depende do metal que está sendo feito no forno e de como o forno é operado. Como a densidade aparente da sílica ativa produzida é geralmente muito baixa, não é econômico transportá-la por longas distâncias. Veja a Seção 2.3 para uma discussão sobre as várias formas de produto de sílica ativa.

n Gravidade específica. A gravidade específica é um número relativo sem unidade que informa como a sílica a fumaça se compara à água, que tem uma gravidade específica de 1,00. Esse número é usado na dosagem do concreto, conforme discutido no Capítulo 5. A sílica ativa tem um peso específico de cerca de 2,2, que é um pouco mais leve que o cimento portland, que tem um peso específico de 3,15. Assim, adicionar sílica ativa a uma mistura de concreto não aumentará a densidade (peso unitário).

2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS

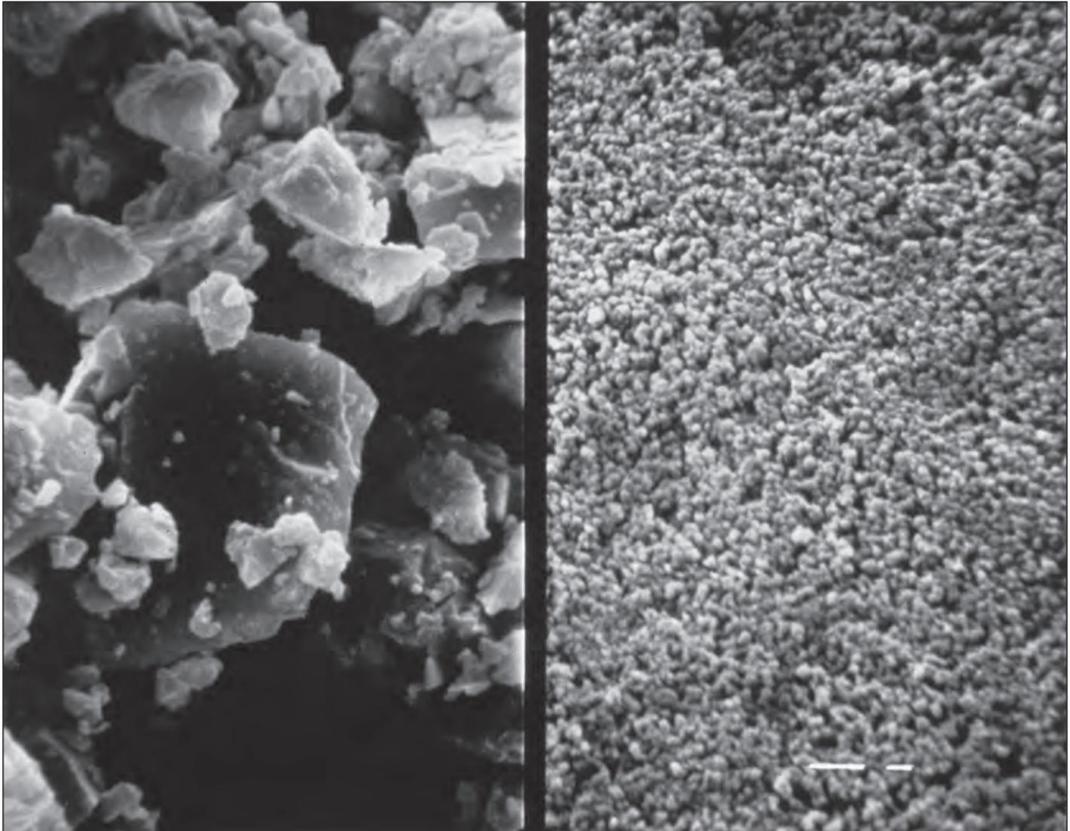


FIGURA 2.1. Fotomicrografia de grãos de cimento portland (esquerda) e partículas de sílica ativa (direita) na mesma ampliação. A barra branca mais longa no lado da sílica ativa tem 1 micrômetro de comprimento. Para dosagens comumente usadas de sílica ativa, haverá um número muito grande de partículas de sílica ativa para cada grão de cimento.

n Superfície específica. Superfície específica é a área total da superfície de um determinado volume de um material.

Como as partículas de sílica ativa são muito pequenas, a área de superfície é muito grande. Sabemos que a demanda de água para areia aumenta à medida que as partículas se tornam menores; o mesmo acontece com a sílica ativa. É por isso que é necessário usar sílica ativa em combinação com um aditivo redutor de água ou um superplastificante. Um teste especializado chamado “método BET” ou “método de adsorção de nitrogênio” deve ser usado para medir a superfície específica da sílica ativa. Determinações de superfície específicas com base na análise de peneira ou teste de permeabilidade ao ar não fazem sentido para a sílica ativa devido ao tamanho extremamente pequeno das partículas.

2.3 TIPOS DE PRODUTOS

Historicamente, a sílica ativa tem estado disponível em quatro formas básicas de produto: não densificada, em pasta, densificada e peletizada. Depois de muitos anos testando e produzindo concreto de sílica ativa em todo o mundo, não há evidências que mostrem que, em uma mistura de concreto bem projetada e produzida adequadamente, qualquer uma das formas dê melhores resultados do que as outras.

A sílica ativa em suspensão não está mais disponível no mercado dos Estados Unidos; pode estar disponível fora dos Estados Unidos. A sílica ativa não densificada está disponível, mas não é freqüentemente usada em concreto pré-misturado ou pré-moldado. A sílica ativa não densificada é usada principalmente em produtos pré-embalados, como rejuntas ou argamassas de reparo. A sílica ativa peletizada é usada principalmente em cimentos misturados. A sílica ativa em pasta, não densificada e peletizada não é discutida em detalhes neste manual.

A Figura 2.2 mostra a sílica ativa densificada e a Tabela 2.3 mostra algumas das características desta forma de produto. A sílica ativa densificada é produzida pelo tratamento de sílica ativa não densificada para aumentar. Este aumento de densidade aparente entre 450 e 700 kg/m³ é realizado pelo aumento na densidade aparente e geralmente a queda das partículas de sílica ativa em um silo, o que causa o acúmulo de cargas na superfície. Essas cargas atraem as partículas para formar aglomerados fracos. Devido ao aumento da densidade a granel, esse material é mais econômico para o transporte em caminhões.



FIGURA 2.2. Sílica ativa densificada.

2.3 TIPOS DE PRODUTOS

TABELA 2.3

CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO DE SÍLICA DENSIFICADA FUME*	
n	Processo de aglomeração reversível
n	Flui bem pneumaticamente
n	O transporte a granel é econômico: 20 toneladas métricas em um navio-tanque a granel
n	A densidade aparente do produto pode ser controlada para condições de manuseio e aplicações

*Esta é a forma de sílica ativa mais freqüentemente usada na construção de concreto.

A sílica ativa densificada funciona muito bem em concreto. No entanto, um cuidado ao trabalhar com esta forma de produto é garantir que a mistura seja adequada para quebrar as aglomerações de partículas. A mistura em alguns tipos de misturadores, como os usados em concreto projetado a seco, telhas ou outras aplicações onde o agregado graúdo não está presente, pode não ser adequada para quebrar as aglomerações. Nessas situações, a sílica ativa não densificada pode ser mais apropriada. Entre em contato com o SFA para obter assistência nesses tipos de aplicativos. Informações adicionais sobre a mistura de sílica ativa densificada são apresentadas no Capítulo 6.

A sílica ativa densificada está disponível conforme mostrado na Tabela 2.4. A granel, a sílica ativa densificada pode ser armazenada e dispensada como qualquer outro material cimentício em uma fábrica de concreto. Informações adicionais sobre armazenamento e distribuição de sílica ativa densificada são apresentadas no Capítulo 6.

TABELA 2.4

DISPONIBILIDADE DE PRODUTO DE SÍLICA FUME				
PRODUTOS FORMA	VOLUME	22,7 kg (50 libras)	11,4 kg (25 libras)	GRANDE BOLSAS
		BOLSAS	BOLSAS	
não densificado	Sim	Sim	Não	Sim*
Densificado	Sim	Sim	Sim	Sim*

*Massa nestes sacos conforme acordado com os fornecedores.

2.4 REAÇÕES NO CONCRETO

Os benefícios observados com a adição de sílica ativa são o resultado de mudanças na microestrutura do concreto. Essas mudanças resultam de dois processos diferentes, mas igualmente importantes. O primeiro deles é o aspecto físico da sílica ativa e o segundo é sua contribuição química.

Aqui está uma breve descrição de ambos os aspectos:

n Contribuições físicas — A adição de sílica ativa traz milhões de partículas muito pequenas a uma mistura de concreto. Assim como o agregado miúdo preenche os espaços entre as partículas de agregado graúdo, a sílica ativa preenche os espaços entre os grãos de cimento. Este fenômeno é freqüentemente chamado de empacotamento de partículas ou micropreenchimento. Mesmo que a sílica ativa não reagisse quimicamente, o efeito do microfiller traria melhorias significativas na natureza do concreto. A Tabela 2.5 e a Figura 2.3 comparam o tamanho das partículas de sílica ativa com outros ingredientes do concreto para ajudar a entender o tamanho real dessas partículas.

n Contribuições químicas — Devido ao seu alto teor de dióxido de silício amorfo, a sílica ativa é um material pozolânico muito reativo no concreto. À medida que o cimento portland no concreto começa a reagir quimicamente com a água, ele forma hidróxidos de silicato de cálcio e libera hidróxido de cálcio. A sílica ativa reage com este hidróxido de cálcio e água para formar hidrato de silicato de cálcio adicional, que é muito semelhante ao hidróxido de silicato de cálcio formado a partir do cimento portland. É esse aglutinante essencialmente adicional que dá ao concreto de sílica ativa suas propriedades endurecidas aprimoradas.

TABELA 2.5

COMPARAÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE SÍLICA FUME E OUTROS INGREDIENTES DE CONCRETO		
MATERIAL	UNIDADES SI	TAMANHO NOMINAL
Partícula de fumaça de sílica	0,5 µm	—
grão de cimento	45 µm	peneira nº 325
grão de areia	2,36 mm	peneira nº 8
Partícula agregada grossa	19,0 mm	peneira de 3/4 de polegada

2.4 REAÇÕES NO CONCRETO

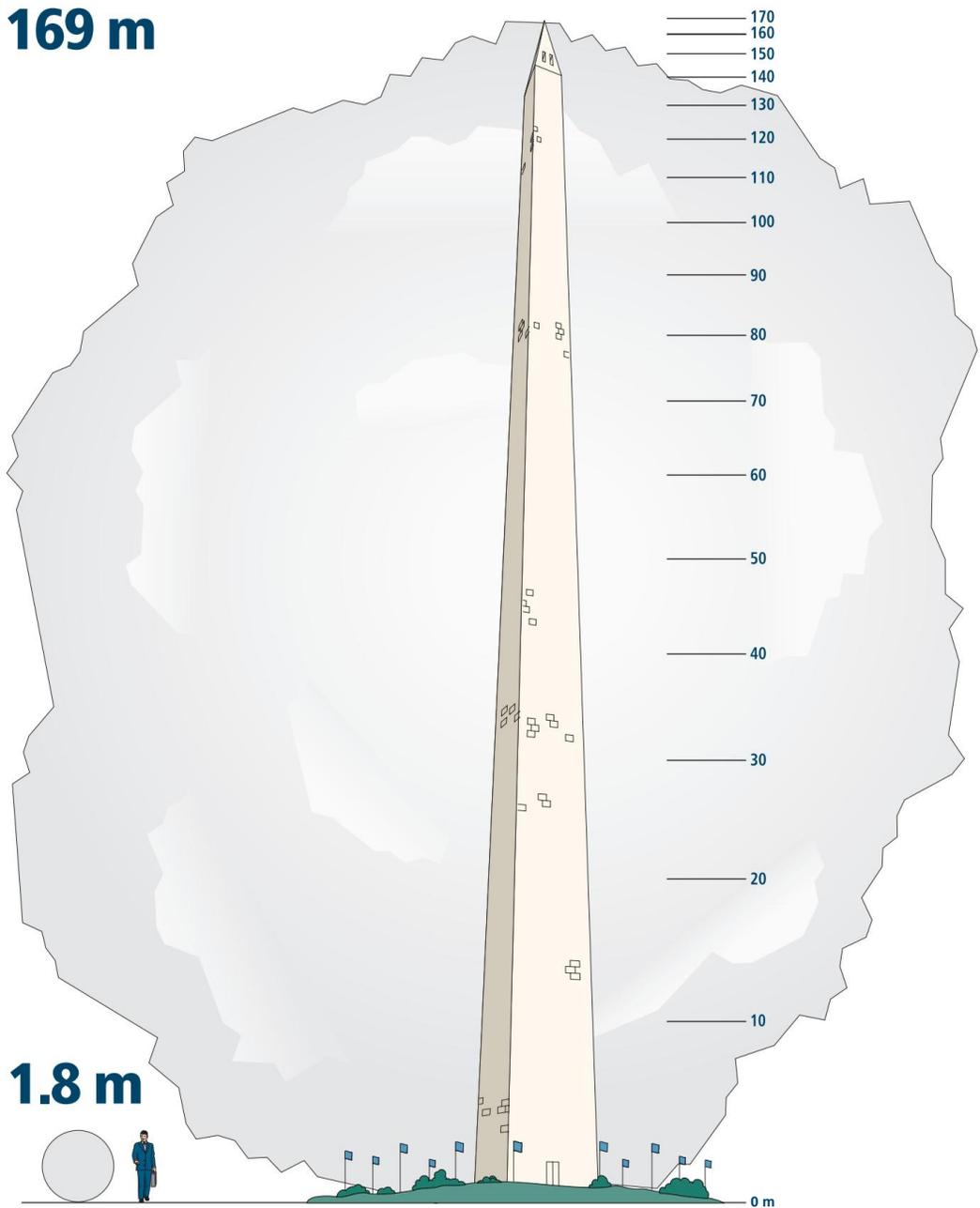


FIGURA 2.3. Comparação geral de tamanho de partículas de sílica ativa. Se uma pessoa (1,8 m) fosse do tamanho de uma partícula de sílica ativa, um grão de cimento teria aproximadamente o tamanho do Monumento a Washington (169 m).

2.5 COMPARAÇÃO COM OUTROS MATERIAIS CIMENTOS SUPLEMENTARES

A sílica ativa raramente é usada como material de substituição direta do cimento portland. Em vez disso, é usado para melhorar as propriedades do concreto, através do empacotamento combinado de partículas e efeitos pozolânicos. Cinzas volantes ou cimento de escória são usados como materiais de substituição do cimento. Ambos os materiais são freqüentemente usados em combinação com cimento portland e sílica ativa. Nesse uso, o cimento pode ser substituído por volumes moderados a grandes de cimento de escória ou cinza volante, e o desempenho do concreto é aprimorado pela adição de sílica ativa. Essa prática reduz o uso de cimento portland, o que também reduz a pegada de carbono do concreto.

A Tabela 2.6 apresenta uma comparação entre sílica ativa e outros materiais cimentícios suplementares comumente usados. A sílica ativa é tipicamente muito mais reativa, particularmente nas primeiras idades, devido ao seu maior teor de dióxido de silício e seu tamanho de partícula muito pequeno.

TABELA 2.6

COMPARAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS — CIMENTO PORTLAND, CINZAS VOADORAS, CIMENTO DE ESCÓRIA E SÍLICA FUME					
<i>Note que estes são valores aproximados. Os valores para um material específico podem variar do que é mostrado. (Nota 1)</i>					
PROPRIEDADE	PORTLAND CIMENTO	CLASSE F CINZAS VOLANTES	CLASSE C CINZAS VOLANTES	ESCÓRIA CIMENTO	SÍLICA FUME
Teor de SiO ₂ , porcentagem	21	52	35	35	85 a 97
teor de Al ₂ O ₃ , porcentagem	5	23	18	12	—
Teor de Fe ₂ O ₃ , porcentagem	3	11	6	1	—
teor de CaO, porcentagem	62	5	21	40	< 1
Finura como área superficial, m ² /kg (Nota 2)	370	420	420	400	15.000 a 30.000
Gravidade Específica	3.15	2.38	2,65	2,94	2.22
Uso geral em concreto	Aglutinante primário	Cimento substituição	Cimento substituição	Cimento	Melhorador de propriedades

Nota 1. Informações de SFA e Kosmatka, Kerkoff e Panarese (2016).

Nota 2. Medições de área de superfície para sílica ativa pelo método de adsorção de nitrogênio. Outros pelo método de permeabilidade ao ar (Blaine).

3 POR QUE A SÍLICA FUMA É UTILIZADA NO CONCRETO?

A sílica ativa é usada no concreto porque melhora significativamente as propriedades do concreto fresco e endurecido. Mais recentemente, os benefícios do uso de sílica ativa para aumentar a sustentabilidade foram reconhecidos. O potencial de uso de sílica ativa no concreto era conhecido no final da década de 1940, mas o material não se tornou amplamente utilizado até o desenvolvimento de outra tecnologia de concreto. Essa tecnologia paralela é o uso de dispersantes poderosos conhecidos como aditivos redutores de água de alto alcance ou superplastificantes. Uma vez que essas misturas químicas se

tornaram disponíveis e aceitas, tornou-se possível o uso e o desenvolvimento da sílica ativa no concreto.

Este capítulo descreve alguns dos efeitos da adição de sílica ativa em concreto fresco e endurecido, incluindo UHPC. O uso de sílica ativa para aumentar a construtibilidade e sustentabilidade também é discutido.

3.1	Sílica Fumo e Concreto Fresco.....	16
3.1.1	Maior Coesão.....	17
3.1.2	Sangramento reduzido	17
3.2	Sílica Fumo e Concreto Endurecido.....	20
3.2.1	Propriedades Mecânicas Aprimoradas	21
3.2.2	Durabilidade Aprimorada.....	27
3.3	Sílica Fumosa e Construtibilidade.....	35
3.4	Fumo de sílica e desempenho ultra-alto Concreto (UHPC)	40
3.5	Sílica Fumegante e Sustentabilidade.....	46

3.1 SÍLICA FUMA E CONCRETO FRESCO

A Figura 3.1 mostra os efeitos da sílica ativa no concreto fresco. Existem dois efeitos distintos: o concreto é mais coeso e o concreto apresenta pouco ou nenhum sangramento. Embora alguns finalizadores possam considerar esses efeitos como tornando o concreto mais difícil de colocar e terminar, na verdade são vantagens do concreto fresco e endurecido.

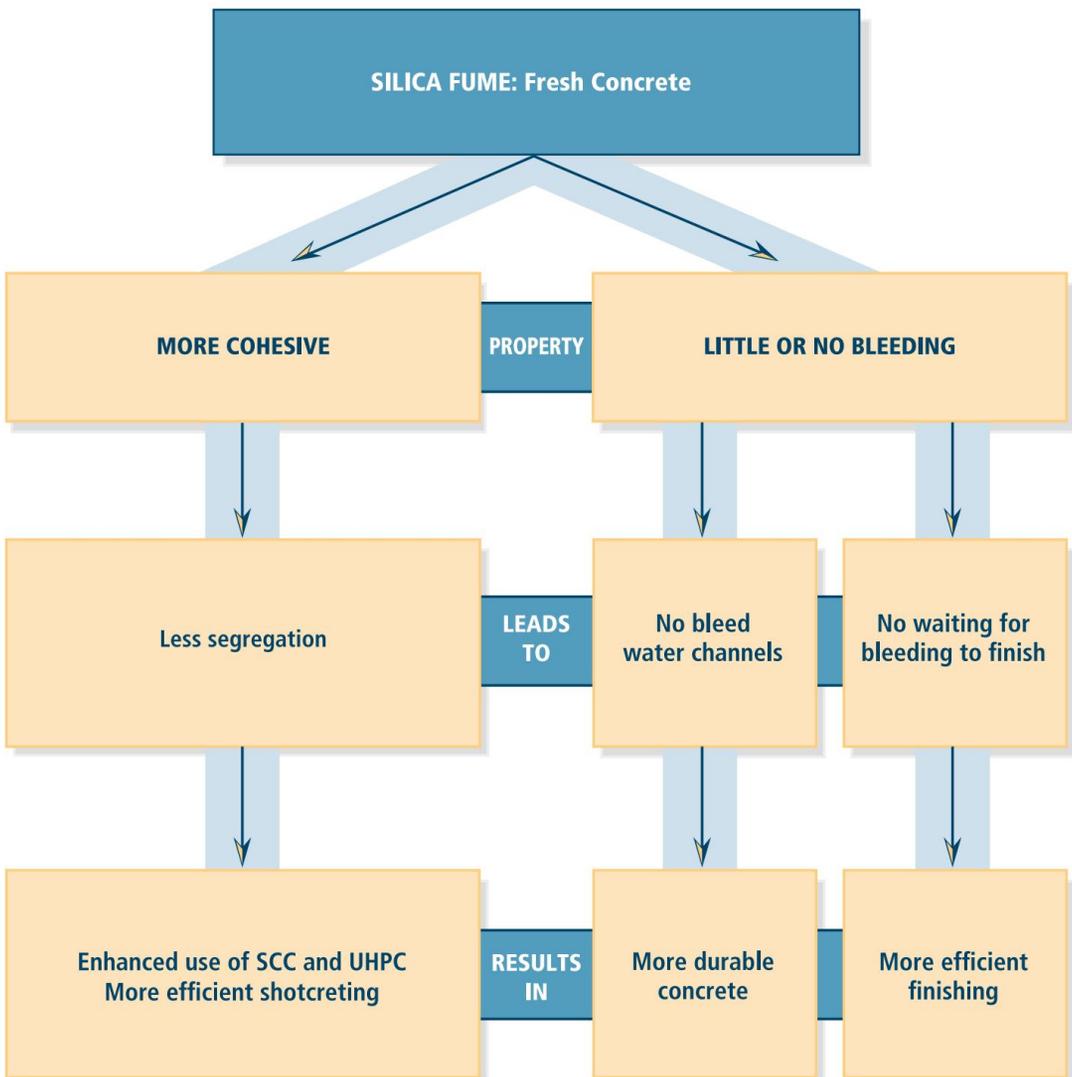


FIGURA 3.1. Os efeitos modificadores da viscosidade da sílica ativa no concreto fresco e sua influência na construtibilidade.

3.1 SÍLICA FUMA E CONCRETO FRESCO

3.1.1 Maior Coesão

O concreto fresco feito com sílica ativa é mais coeso e, portanto, menos propenso à segregação do que o concreto sem sílica ativa. A maior coesão permite que o concreto de sílica ativa seja usado em aplicações de fluidez muito alta, como concreto auto-adensável (SCC) ou concreto de ultra-alto desempenho (UHPC). (Esses materiais são discutidos posteriormente neste capítulo.) Se o fluxo de abatimento (ASTM C1611, *Método de teste padrão para fluxo de abatimento de concreto autoadensável*) for usado para caracterizar o concreto, valores de 600 a 750 mm podem ser obtidos sem segregação. Se a fluidez for medida por abatimento, o concreto de sílica ativa é normalmente colocado com pelo menos 50 mm de abatimento maior do que o concreto sem sílica ativa no mesmo local.

Um benefício adicional do aumento da coesão pode ser visto no concreto projetado, seja para novas construções, reparo de estruturas existentes ou suporte de solo em operações de abertura de túneis. O uso de sílica ativa em concreto projetado é discutido na Seção 3.3.

3.1.2 Sangramento reduzido

Devido à alta área de superfície da sílica ativa e ao geralmente baixo teor de água do concreto de sílica ativa, haverá muito pouco ou nenhum sangramento. Uma vez atingido um teor de sílica ativa de cerca de cinco por cento, não haverá sangramento na maioria das misturas de concreto.

O concreto sangra à medida que os componentes mais pesados se acomodam sob a influência da gravidade antes que o concreto endureça. À medida que os componentes mais pesados assentam, a água mais leve é forçada para cima. Parte da água fica presa sob partículas agregadas ou aço de reforço e parte atinge a superfície do concreto. Esse movimento da água ocorre nos chamados canais capilares, conforme mostrado na Figura 3.2. Depois que a água evapora, esses canais servem como atalhos para que agentes agressivos, como íons cloreto de sais de degelo ou água do mar, voltem ao concreto. Portanto, a redução ou eliminação desses canais melhora a durabilidade do concreto.

3.1 SÍLICA FUMA E CONCRETO FRESCO

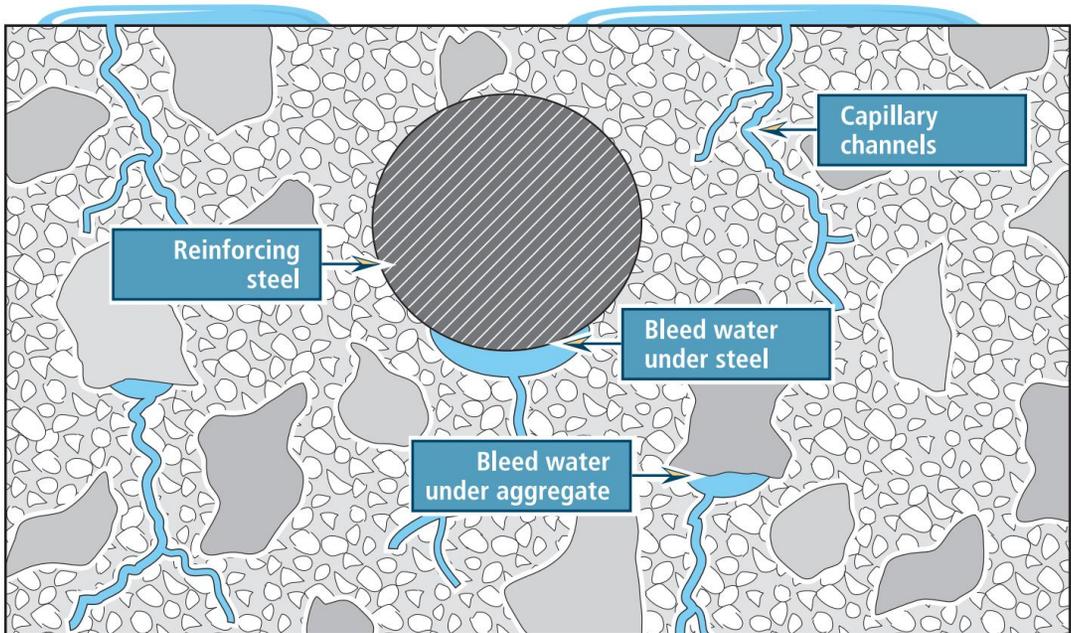


FIGURA 3.2. Esquema de sangramento e canais capilares. A redução ou eliminação do sangramento é um benefício da adição de sílica ativa a uma mistura de concreto.

Além das melhorias na durabilidade, a ausência de exsudação permite um processo de acabamento mais eficiente para ser usado com planos de concreto de sílica ativa. Para concreto convencional, é crítico não realizar operações de acabamento até que todo o sangramento tenha parado e toda a água tenha evaporado da superfície. Assim, geralmente há um período de espera de várias horas após as operações iniciais de colocação e acabamento. Uma vez que a água de sangria tenha desaparecido e o concreto tenha adquirido resistência suficiente, o acabamento final é iniciado.

3.1 SÍLICA FUMA E CONCRETO FRESCO

Com o concreto de sílica ativa sem sangramento, a operação de acabamento pode ser contínua desde a colocação até a texturização e cura. Essa abordagem é chamada de acabamento “one-pass” ou “fast-track” e é particularmente vantajosa em estruturas onde é provável que a sílica ativa seja especificada para durabilidade, como decks de pontes ou estruturas de estacionamento. A Figura 3.3 mostra o acabamento de uma passagem de concreto de sílica ativa em uma estrutura de estacionamento. A menos que seja necessário um acabamento especial, não é incomum que o acabamento do concreto de sílica ativa seja concluído em meia hora após o concreto chegar ao convés. O acabamento é discutido em detalhes no Capítulo 7.



FIGURA 3.3. Acabamento em um passe de concreto de sílica ativa em uma estrutura de estacionamento. Colocação, acabamento, texturização e cura são feitos como um processo contínuo.

3.2 SÍLICA FUMA E CONCRETO ENDURECIDO

A Figura 3.4 mostra os efeitos da sílica ativa no concreto endurecido. Existem dois efeitos distintos: propriedades mecânicas aprimoradas, como resistência e módulo de elasticidade, e durabilidade aprimorada, que é amplamente alcançada pela permeabilidade reduzida. Ambos os efeitos são discutidos nas seções a seguir.

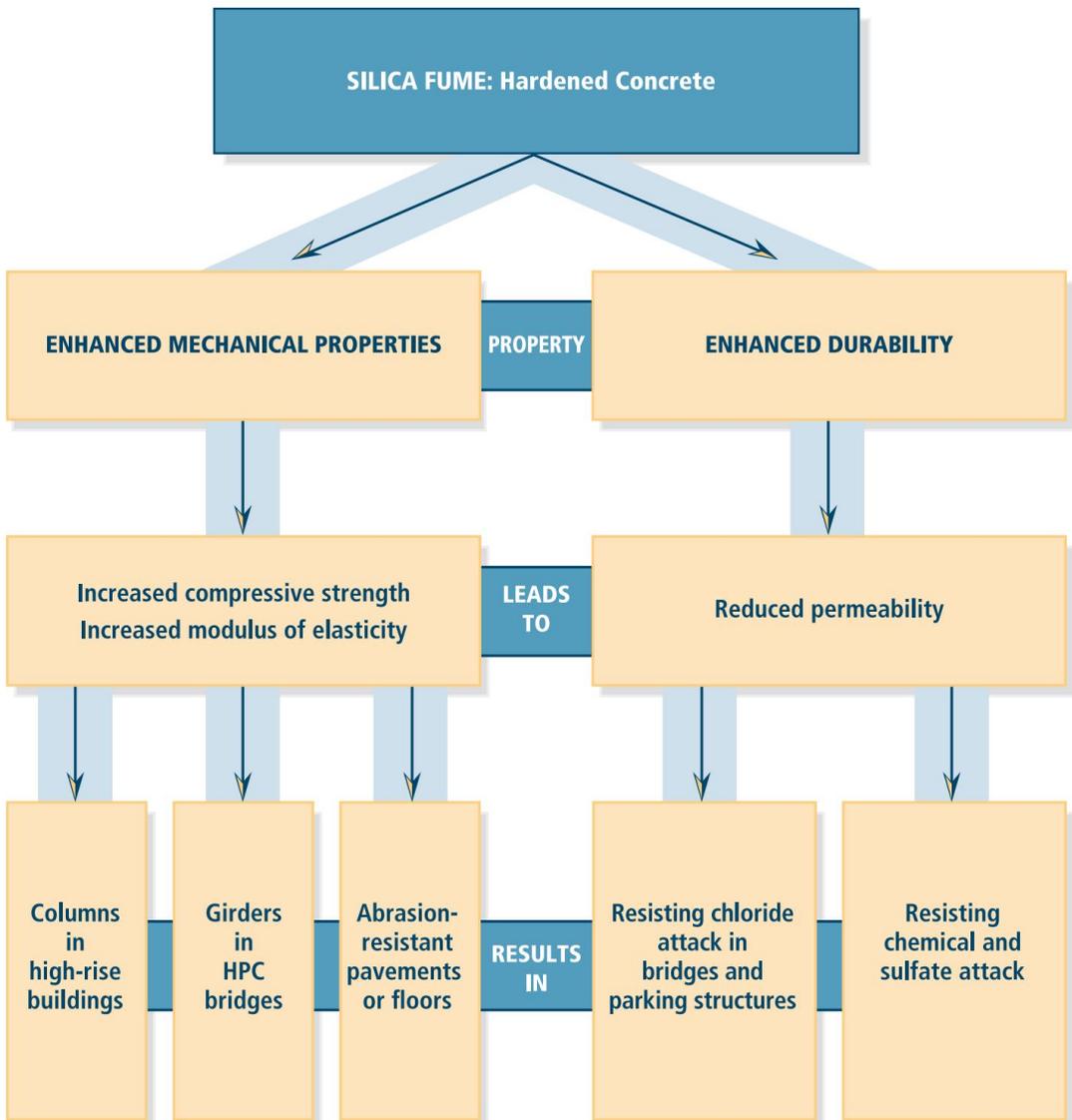


FIGURA 3.4. Efeitos da sílica ativa no concreto endurecido e como esses efeitos são usados em aplicações de concreto.

3.2 SÍLICA FUMA E CONCRETO ENDURECIDO

3.2.1 Propriedades mecânicas aprimoradas

A sílica ativa ganhou atenção inicial no mercado de concreto devido à sua capacidade de produzir concretos com resistência à compressão muito elevada. Melhorias em outras propriedades mecânicas, como módulo de elasticidade ou resistência à flexão também são vistas. Embora o concreto tenha sido especificado para aproveitar as melhorias nessas outras propriedades, a propriedade mecânica de maior interesse é certamente a resistência à compressão.

3.2.1.1 – Aumento da resistência à compressão A

Figura 3.5 mostra os efeitos na resistência à compressão do uso de diferentes quantidades de cimento, cinza volante, sílica ativa e água no concreto. Informações básicas sobre a mistura são fornecidas na Tabela 3.1. As curvas que são mostradas são típicas do que se pode esperar. Existem vários pontos importantes nesta figura:

1. O aumento da força é proporcional em todas as idades. Assim, a proporção de força de 3 dias ou 7 dias para força de 28 dias é razoavelmente consistente, independentemente da força de 28 dias alcançada. Essa proporção será aproximadamente a mesma para concreto com ou sem sílica ativa - a resistência de 3 dias será de cerca de 50% e a resistência de 7 dias será de cerca de 70% da resistência de 28 dias.
2. Adicionar mais sílica ativa geralmente aumenta a resistência. No entanto, os efeitos do teor de água, teor de cinzas volantes e tipo, se usado, e sílica ativa interagem para determinar a resistência à compressão e a taxa de desenvolvimento da resistência à compressão.
3. A sílica ativa tem o maior impacto na resistência à compressão em cerca de 28 dias. Enquanto o concreto normalmente continuará a ganhar resistência após 28 dias, a taxa de ganho de resistência será muito mais lenta. Essa curva de ganho de resistência é muito diferente de uma cinza volante ASTM C618 Classe F, que também é um material puramente pozolânico.
4. Os resultados apresentados são de diferentes projetos utilizando diferentes materiais. **Você deve testar qualquer propor proporções de mistura usando seus materiais específicos do projeto.**

3.2 SÍLICA FUMA E CONCRETO ENDURECIDO

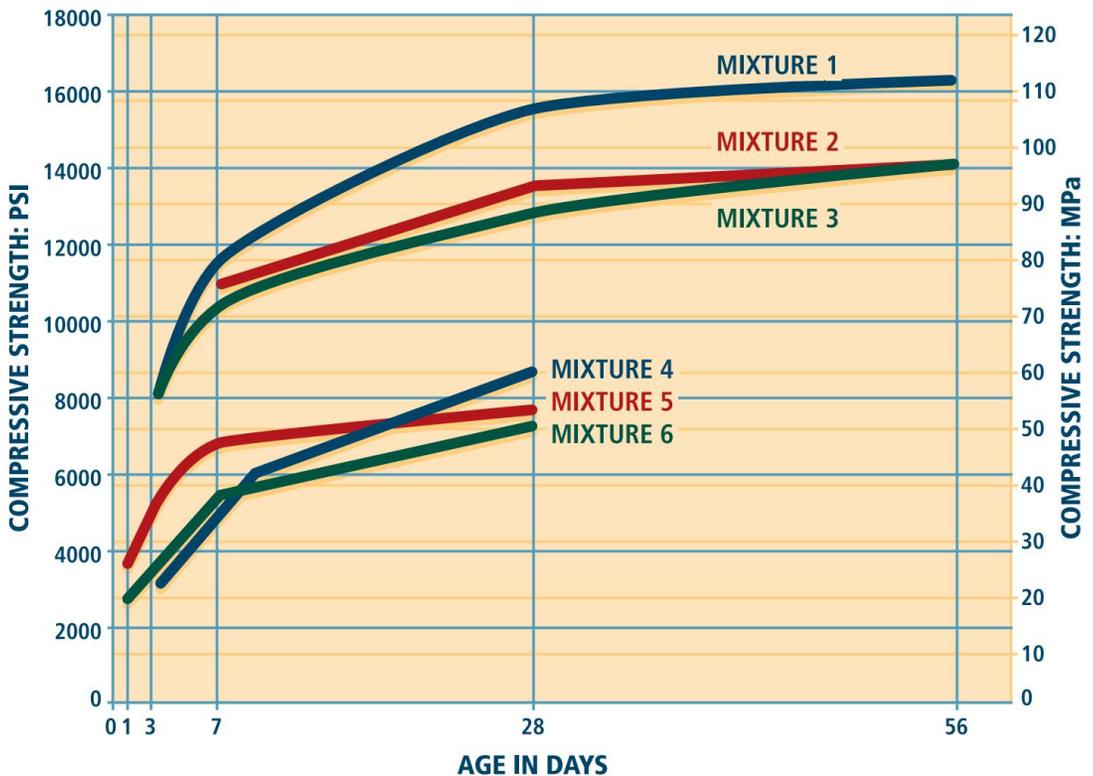


FIGURA 3.5. Desenvolvimento de resistência de diversas misturas de concreto contendo sílica ativa. Detalhes para as misturas são fornecidos na tabela abaixo.

TABELA 3.1

MISTURAS DE CONCRETO USADAS PARA DESENVOLVIMENTO DE RESISTÊNCIA					
DADOS MOSTRADOS NA FIGURA 3.5					
MISTURAS	CIMENTO kg/m ³	CINZAS VOADORAS kg/m ³	SF kg/m ³	SF por cento (Nota 1) W/CM	
1 (Nota 3)	475	104	74	11	0,23
2 (Nota 2)	390	71	48	9	0,37
3 (Nota 3)	475	59	24	4	0,29
4 (Nota 2)	390	—	27	6	0,35
5 (Nota 2)	362	—	30	8	0,39
6 (Nota 2)	390	—	30	7	0,37

Nota 1. Sílica ativa em porcentagem do total de materiais cimentícios, em massa.

Nota 2. Dados fornecidos pela Elkem.

Nota 3. Dados de Burg e Ost (1994). São as misturas 8 e 9 da Tabela 5.3 deste manual.

3.2 SÍLICA FUMA E CONCRETO ENDURECIDO

Vários exemplos de como o concreto de alta resistência é usado na construção são descritos abaixo.

As primeiras aplicações de concreto de sílica ativa de alta resistência foram em colunas para estruturas altas, conforme mostrado na Figura 3.6. Ao analisar como as cargas do edifício são transportadas até a fundação, verifica-se que o uso de concreto de alta resistência é muito eficiente. À medida que a resistência do concreto aumenta, o tamanho da coluna pode ser reduzido. Além de reduzir o tamanho dos pilares, o uso desse concreto pode reduzir e simplificar a armadura de aço utilizada nos pilares. No geral, mais espaço disponível para o proprietário da estrutura, o que pode ser uma vantagem de custo significativa em áreas urbanas. A redução no tamanho do pilar e armadura para um carregamento típico é mostrada na Tabela 3.2. Informações adicionais sobre o uso de concreto de alta resistência para reduzir o tamanho da coluna e armaduras podem ser encontradas no artigo de Smith e Rad (1989). Ao reduzir a quantidade de concreto e aço de reforço necessários, os pilares de concreto de alta resistência também contribuem para a sustentabilidade da estrutura.



FIGURA 3.6. Coluna de concreto de sílica ativa de alta resistência em estrutura de grande altura.

TABELA 3.2

REDUÇÃO DO TAMANHO DA COLUNA E REFORÇO COM BASE NO AUMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO A carga na coluna é de 50 MN. (Dados da SFA.)			
RESISTÊNCIA DO CONCRETO, MPa	TAMANHO DA COLUNA, metros	REFORÇO OBRIGATÓRIO	COMENTÁRIOS
40	1,2 x 1,2	56 nº 36	Caso base
55	1,2 x 1,2	24 nº 29	Economize aço
85	1,2 x 0,75	24 nº 22	Economize aço e reduza o tamanho
85	0,95 x 0,95	24 nº 22	Economize aço e reduza o tamanho

3.2 SÍLICA FUMA E CONCRETO ENDURECIDO

3.2.1.2 – Aumento da Resistência à Compressão em Pontes

Concreto de alta resistência ou concreto de ultra-alto desempenho têm sido utilizados em pontes construídas por vários DOTs estaduais. Em geral, esses DOTs usaram esses concretos para atingir um ou mais desses quatro objetivos:

n Aumentar o vão de uma ponte. A Figura 3.7 mostra uma ponte construída pelo Ohio DOT na qual um único vão substituiu três vãos na ponte anterior neste local.



FIGURA 3.7. Ponte de concreto de alto desempenho. Nesta ponte em Ohio, o concreto de alta resistência foi usado para aumentar o comprimento do vão e eliminar um píer no rio. Para mais informações sobre esta ponte, ver o artigo de Miller (1999).

3.2 SÍLICA FUMA E CONCRETO ENDURECIDO

n Reduzir o número de vigas para um determinado vão. A Figura 3.8 mostra uma ponte construída pela New Hampshire DOT onde o número de vigas foi reduzido de sete para cinco.



FIGURA 3.8. Ponte de concreto de alto desempenho. Nesta ponte em New Hampshire, o concreto de alta resistência foi usado para reduzir o número de vigas necessárias para a estrutura. Para mais informações sobre esta ponte, ver o artigo de Wasczik (1999).

3.2 SÍLICA FUMA E CONCRETO ENDURECIDO

n Para reduzir a altura da seção para um determinado vão. O Colorado DOT usou concreto de sílica ativa de alta resistência para a ponte da Figura 3.9. Aqui, uma ponte de dois vãos substituiu uma ponte anterior de quatro vãos. As novas vigas eram mais rasas do que as anteriores, dando um aumento na folga de cerca de 450 mm.



FIGURA 3.9. Ponte de concreto de alto desempenho. Nesta ponte no Colorado, o concreto de alta resistência foi usado para aumentar o comprimento do vão para eliminar dois pilares e aumentar a folga sob a ponte. Para mais informações sobre esta ponte, ver o artigo de Leonard (1999).

n Para aumentar o desempenho da ponte. Concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) tem sido usado em uma variedade de aplicações de pontes para aumentar o desempenho. As propriedades UHPC permitem que os projetistas incorporem seções transversais mais rasas, membros mais finos e vãos mais longos. Em aplicações de reparo e reabilitação, cargas de peso mais baixas e altos níveis de durabilidade são prontamente alcançáveis. Consulte a Seção 3.4 para uma discussão adicional sobre o uso de UHPC.

3.2 SÍLICA FUMA E CONCRETO ENDURECIDO

3.2.2 Durabilidade Aprimorada

O uso de sílica ativa no concreto aumenta a durabilidade por meio de três mecanismos: redução da permeabilidade, atividade pozolânica e aumento da resistência à compressão. Esses mecanismos são descritos nas seções a seguir.

3.2.2.1 – Permeabilidade Reduzida

Em muitas situações, a durabilidade do concreto está diretamente relacionada à sua permeabilidade. Um meio de reduzir a permeabilidade é reduzir a w/cm do concreto. No entanto, o uso de sílica ativa pode reduzir ainda mais significativamente a permeabilidade do concreto. (Essa redução adicional é discutida com mais detalhes abaixo.) A Figura 3.10 explica a permeabilidade e por que ela é importante no concreto. Ao reduzir a permeabilidade, aumenta-se o tempo para que qualquer produto químico agressivo penetre no concreto e cause danos. A seguir estão alguns exemplos de como a redução da permeabilidade é usada em estruturas reais.

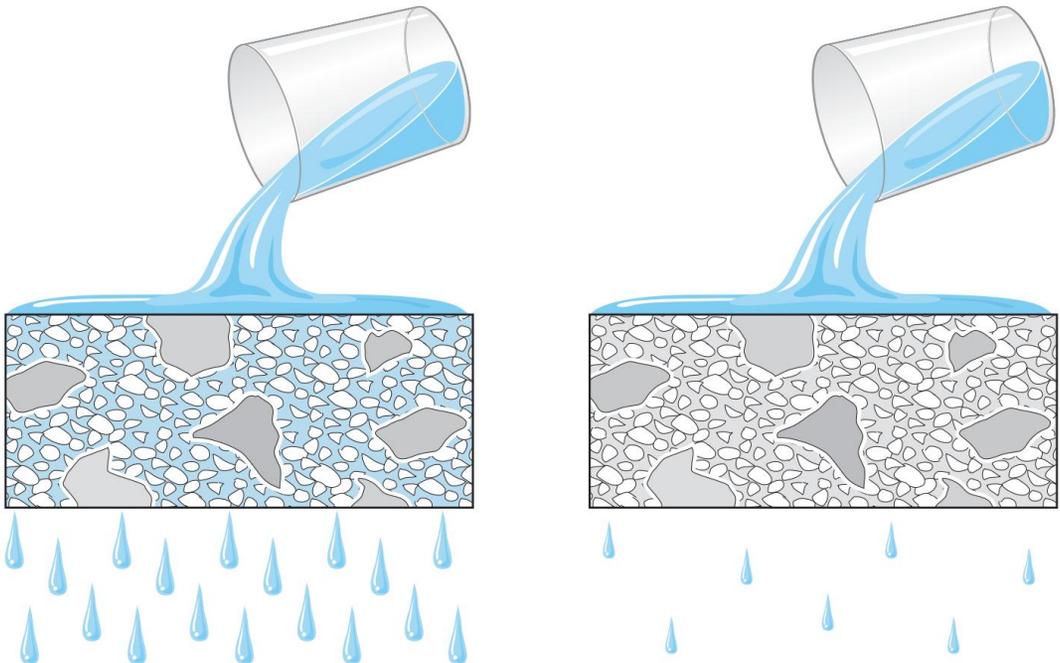


FIGURA 3.10. Esquema de permeabilidade do concreto. Um concreto de alta permeabilidade (esquerda) permite que a água se mova para dentro e através do concreto facilmente. Diminuir a w/cm e adicionar sílica ativa pode reduzir a permeabilidade a praticamente zero (à direita). Essa redução dificulta muito a entrada de água e produtos químicos agressivos, como cloretos ou sulfatos, no concreto.

3.2 SÍLICA FUMA E CONCRETO ENDURECIDO

n Danos por cloreto no aço de reforço. A corrosão do aço de reforço é a causa mais significativa e dispendiosa de deterioração do concreto. A Figura 3.11 mostra como a corrosão ocorre no concreto. Não importa se o cloreto vem do oceano ou dos sais de degelo, os resultados são os mesmos. Concreto de sílica ativa é amplamente utilizado em aplicações onde o concreto é exposto ao sal de qualquer fonte. A permeabilidade reduzida deste concreto pode resultar em muitos anos de vida útil estendida para uma estrutura.

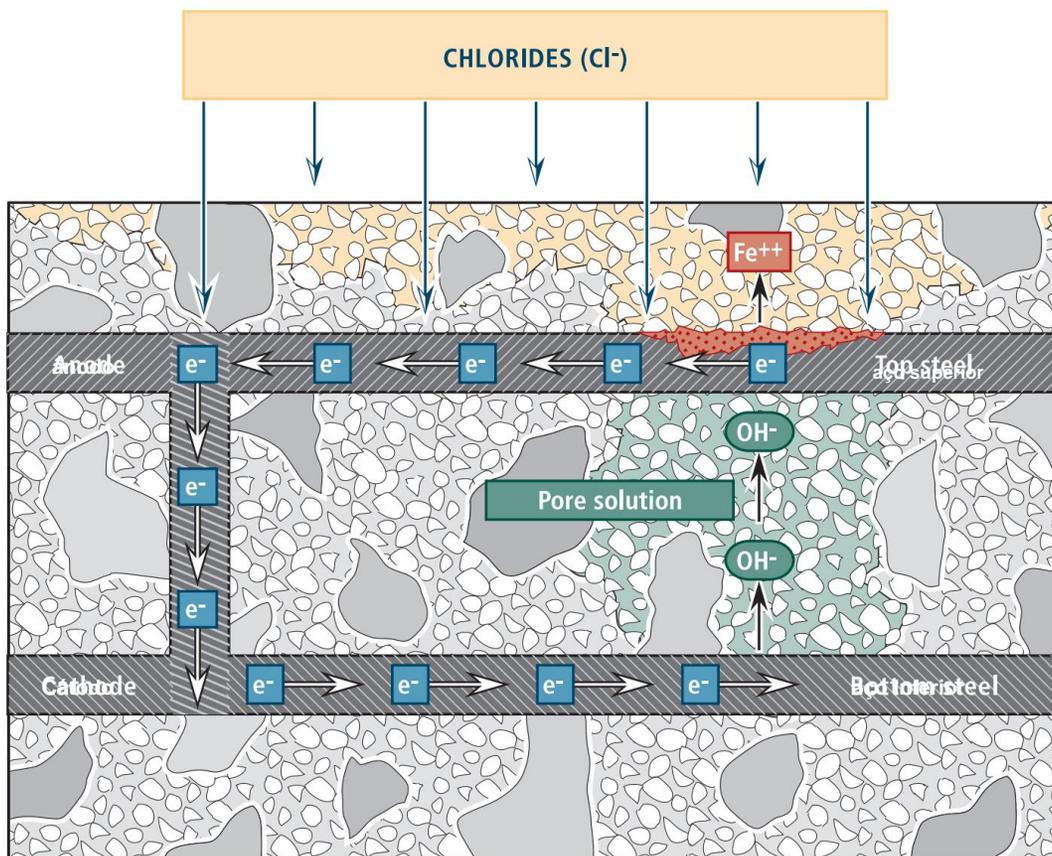


FIGURA 3.11. Esquema de corrosão em concreto armado. No ânodo, os íons cloreto interagem com o ferro para produzir íons Fe^{++} . Os elétrons liberados fluem através do aço de reforço para o cátodo. O caminho elétrico é completado por íons OH^- fluindo através da solução de poros (eletrólito). Em alguns casos, o ânodo e o cátodo podem estar na mesma barra. Ao reduzir a permeabilidade do concreto, a sílica ativa retarda a chegada dos cloretos ao aço.

3.2 SÍLICA FUMA E CONCRETO ENDURECIDO

As Figuras 3.12 e 3.13 mostram o concreto com danos causados pela corrosão. Observe que o dano por corrosão no concreto é um processo de várias etapas, como segue:

1. Os íons de cloreto trabalham lentamente no concreto para atingir o nível do aço de reforço. Uma vez que uma certa quantidade de cloretos, chamada de quantidade limite, atinge o aço, a corrosão começa. Os íons de cloreto não são consumidos no processo - eles continuarão a causar corrosão adicional.
2. À medida que os íons de ferro são removidos do aço de reforço, eles passam por vários estágios de oxidação ou ferrugem. O volume da ferrugem aumenta a cada estágio.
3. À medida que a quantidade de ferrugem aumenta, manchas de ferrugem serão vistas na superfície do concreto. Em seguida, rachaduras serão vistas. Finalmente, a fissuração resultará em delaminações e lascamento do concreto sobre a armadura de aço.

Como a sílica ativa é um material pozolânico que reage com o hidróxido de cálcio, surgiram preocupações sobre uma possível redução do pH do concreto, de modo que o aço de reforço não seja mais passivado. Qualquer redução no pH do concreto pelo uso de sílica ativa é pequena e não afeta a passividade do aço de reforço.



FIGURA 3.12. Danos por corrosão a uma estrutura marítima.



FIGURA 3.13. Danos por corrosão em um viaduto de rodovia. Observe que os cloretos aparentemente escorreram do convés para este píer. Os elementos estruturais, assim como os decks, devem ser protegidos.

3.2 SÍLICA FUMA E CONCRETO ENDURECIDO

n Aumentar a expectativa de vida de pontes expostas a cloretos. Com décadas de dados sobre construção de pontes de concreto e reparos ou substituições associadas, estendendo a vida útil de pontes de concreto, particularmente aquelas expostas a ambientes agressivos de cloreto, pode reduzir significativamente os custos do ciclo de vida. Para maximizar a longevidade na infraestrutura, as classificações de permeabilidade de cloreto conforme determinado pelo ASTM C1202, *método de teste padrão para indicação elétrica da capacidade do concreto de resistir à penetração de íons de cloreto*, normalmente referido como teste rápido de permeabilidade de cloreto (RCPT,) são frequentemente especificados, às vezes em conjunto com uma vida útil especificada. A Figura 3.14 mostra como alterar w/cm e adicionar sílica ativa pode alterar a permeabilidade ao cloreto do concreto. A redução de w/cm mostra algum benefício, mas a adição de sílica ativa é muito mais eficaz conforme medido por ambos os testes

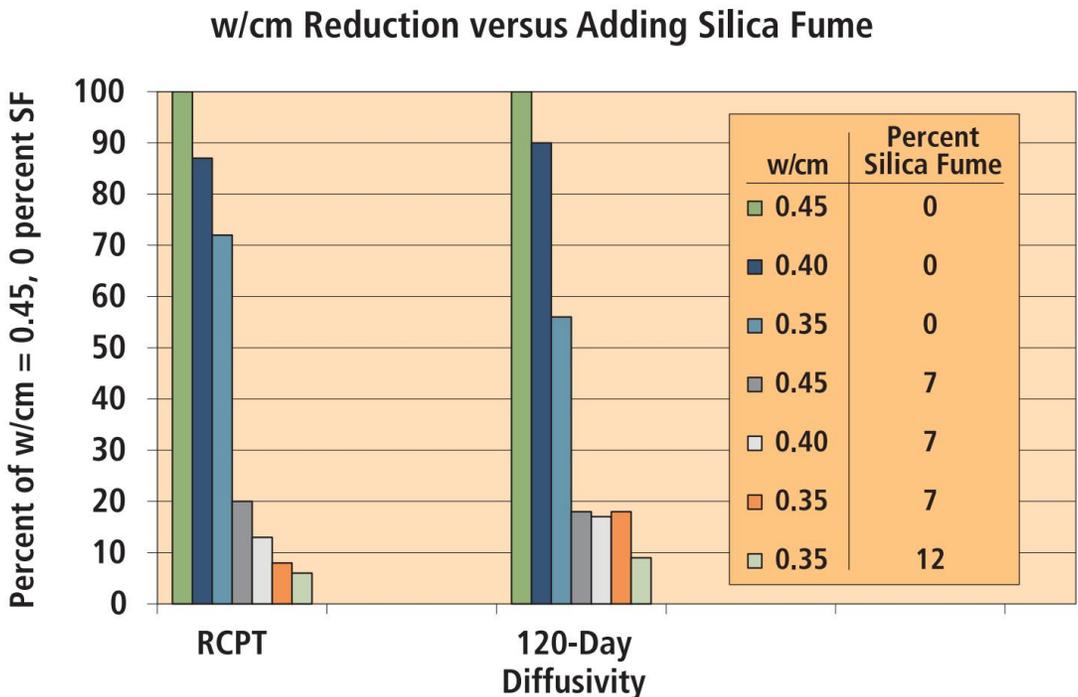


FIGURA 3.14. Comparação da redução de w/cm e adição de sílica ativa na permeabilidade aos cloretos do concreto. O caso base (w/cm de 0,45 e sem sílica ativa) tinha um valor RCPT de aproximadamente 3500 coulombs. Este concreto também teve uma difusividade de 120 dias de $10,5 \times 10^{-12}$ m²/seg. (Hooton, et.al 1997.)

3.2 SÍLICA FUMA E CONCRETO ENDURECIDO

Além disso, o software Life-365,™ * está disponível e permite previsões de vida útil em uma variedade de exposições a cloreto. Dados de várias misturas de concreto de sílica ativa mostrando taxas de cloreto e vida útil prevista são apresentados no Capítulo 5. A Figura 3.15 mostra uma ponte em um ambiente marinho onde o concreto de sílica ativa foi usado para reduzir a permeabilidade de cloreto e aumentar a vida útil esperada. A Figura 3.16 mostra uma ponte de 32,5 km de comprimento com uma vida útil especificada de 100 anos.



FIGURA 3.15. Depois que o furacão Katrina danificou a rodovia I-10 em Nova Orleans, o Departamento de Transporte da Louisiana projetou sua substituição para uma vida útil mais longa com maior durabilidade do concreto, especificando uma taxa de permeabilidade rápida de cloreto muito baixa em sua nova estrutura de concreto.

**Life-365™ pode ser obtido gratuitamente no site da SFA. A marca registrada do Life-365 é de propriedade da SFA. O sobrescrito da marca registrada não será mostrado no restante do manual.*

3.2 SÍLICA FUMA E CONCRETO ENDURECIDO



FIGURA 3.16. As especificações da Ponte do Mar do Leste, com 32,5 km de comprimento, entre o porto de Xangai e a ilha de Little Yangshan, exigiam uma vida útil de 100 anos. Concreto quaternário de alto desempenho, incluindo cimento portland, sílica ativa, cinzas volantes e cimento de escória, foi utilizado para os projetos estruturais de 35 MPa e 50 MPa, resultando em uma redução do coeficiente de difusão de cloreto de até 75% em relação ao concreto convencional e permeabilidade rápida de cloreto muito baixa abaixo de 750 coulombs.

n Ataque de sulfato. Embora a química do cimento portland usado desempenhe um papel importante no ataque por sulfato, foi demonstrado que a relação água-materiais cimentícios (w/cm) também é um fator crítico. Reduzir o w/cm reduz efetivamente a permeabilidade do concreto. A adição de sílica ativa reduzirá ainda mais a permeabilidade, resultando em mais atrasos de quaisquer reações adversas.

3.2 SÍLICA FUMA E CONCRETO ENDURECIDO

3.2.2.2 Atividade Pozolânica Em

algumas situações em que é necessária maior durabilidade, a sílica ativa pode fornecer proteção por sua reação pozolânica. Normalmente, essa reação funciona em conjunto com a redução da permeabilidade para aumentar a durabilidade. Exemplos são:

n Ataque químico. Dependendo da natureza do produto químico agressivo e da mistura de concreto utilizada, o concreto de sílica ativa pode ser mais resistente a essa forma de ataque do que um concreto de cimento portland comum. Essa resistência melhorada se deve ao consumo de algum hidróxido de cálcio pela reação pozolânica e à permeabilidade bastante reduzida. Essa resistência a produtos químicos agressivos pode prolongar a vida útil de uma estrutura ou os intervalos entre as operações de manutenção. Ao projetar uma mistura de concreto de sílica ativa para resistência a qualquer ataque químico específico, é essencial realizar testes de exposição para estabelecer a dosagem ideal de sílica ativa para a aplicação.

n Reação álcali-sílica. Há ampla evidência de que a sílica ativa, quando usada sozinha ou em conjunto com uma cinza volante adequada, pode reduzir ou eliminar o potencial de reação álcali-sílica quando agregados reativos são usados. Serão necessários testes para determinar a quantidade e os tipos apropriados de materiais cimentícios a serem usados para cada aplicação específica. Consulte *ASTM C1778, Guia Padrão para Redução do Risco de Reação Deletéria de Álcali-Agregado em Concreto*, para orientação sobre testes e seleção das quantidades apropriadas de sílica ativa a serem usadas.

3.2 SÍLICA FUMA E CONCRETO ENDURECIDO

3.2.2.3 Aumento da resistência à compressão O

aumento da resistência à compressão pode desempenhar um papel direto no aumento da resistência do concreto à abrasão.

n Resistência à abrasão. Para concreto feito com um determinado agregado, quanto maior o resistência à compressão, maior a resistência à abrasão. Além disso, o concreto de sílica ativa desenvolve maior aderência às partículas de agregados, o que aumenta a resistência à abrasão. Concreto de sílica ativa de alta resistência tem sido usado em aplicações como estações de transferência de resíduos e bacias de dissipação em grandes barragens. Consulte a Figura 3.17.

Em 2014, a SFA patrocinou um programa de pesquisa para a Administração Ferroviária Federal (FRA) para abordar a abrasão do assento ferroviário de dormentes ferroviários de concreto. As misturas de concreto testadas e os dados de desempenho são apresentados no Capítulo 5.



FIGURA 3.17. Concreto danificado por abrasão-erosão. Essa estrutura foi reparada com concreto de sílica ativa de alta resistência com resistência à compressão especificada de 86 MPa. Para mais informações sobre este projeto, veja o artigo de Holland et al. (1986).

3.3 SÍLICA FUME E CONSTRUTIVABILIDADE

Outra maneira de olhar para o uso de sílica ativa é do ponto de vista da construtibilidade. Aqui, estamos atravessando a fronteira entre os efeitos no concreto fresco e endurecido para aproveitar todos os aspectos do desempenho do concreto de sílica ativa para tornar a construção mais fácil ou, em alguns casos, até possível. Aqui estão alguns exemplos:

n Acabamento em uma passada. A falta de sangramento no concreto de sílica ativa oferece a vantagem de completando o acabamento em uma única operação contínua. O proprietário obterá uma superfície melhor e o empreiteiro poderá concluir o acabamento em menos tempo usando menos finalizadores. O acabamento em um passe é discutido em detalhes no Capítulo 7.

n Redução do calor de hidratação. Embora a sílica ativa contribua com aproximadamente a mesma quantidade de calor de hidratação que uma massa igual de cimento portland, sua contribuição de resistência é muito maior na mesma base. Portanto, ao equilibrar o cimento portland e a sílica ativa em uma mistura, o calor de hidratação pode ser reduzido enquanto a resistência é mantida.

Mais e mais DOTs estaduais estão usando combinações de sílica ativa e cinzas volantes para reduzir o calor de hidratação do concreto usado em tabuleiros de pontes. Um concreto típico do Colorado DOT é mostrado como Mistura 11 na Tabela 5.2. A quantidade total de material cimentício neste concreto é quase a mesma que a quantidade de cimento portland sozinho em muitas misturas anteriores. Reduzir a quantidade total de cimento portland reduzirá o calor e ajudará a prevenir rachaduras precoces.

n Utilização de vários materiais cimentícios. Há uma ênfase cada vez maior no uso de materiais mais recuperados, como cinzas volantes e escória de cimento no concreto. No entanto, a resistência inicial do concreto pode sofrer como resultado. A adição de pequenas quantidades de sílica ativa pode compensar essa redução na resistência inicial. As misturas contendo três materiais cimentícios são chamadas de “misturas ternárias”. Normalmente, o uso de combinações de três materiais cimentícios reduz o custo do concreto. A Figura 3.18 mostra uma estrutura onde sílica ativa foi adicionada para obter uma redução no calor e para compensar a perda de resistência de idade precoce resultante do uso de um grande volume de cinzas volantes.

3.3 SÍLICA FUME E CONSTRUTIVABILIDADE



FIGURA 3.18. Concreto contendo cimento portland, cinzas volantes e sílica ativa sendo colocado. As cinzas volantes foram usadas para controlar o calor de hidratação, enquanto a sílica ativa forneceu resistência inicial necessária para formas de decapagem. Para mais informações sobre este projeto, ver o artigo de Holland (1998).

3.3 SÍLICA FUME E CONSTRUTIVABILIDADE

Em alguns casos, quatro materiais cimentícios foram usados, resultando em uma “mistura quaternária” contendo cimento portland, sílica ativa, cinzas volantes e cimento de escória. A East Sea Bridge (mostrada anteriormente na Figura 3.16) usou quatro materiais cimentícios. O World Trade Center, mostrado na Figura 3.19, também usou uma mistura quaternária para um concreto altamente bombeável e auto-adensável. Uma das misturas de concreto usadas nesta estrutura é mostrada no Capítulo 5.



FIGURA 3.19. Para o World Trade Center, a alta resistência foi inicialmente o principal objetivo das propriedades do concreto endurecido. A capacidade de atingir a capacidade de bombeamento de longa distância, vertical e de estágio único do SCC, juntamente com a consolidação em torno do reforço congestionado, foi, em última análise, um objetivo mais importante no estado fresco desse concreto. Essa mistura de concreto também se destacou por sua pegada de baixo carbono.

3.3 SÍLICA FUME E CONSTRUTIVABILIDADE

n Concreto projetado. O concreto projetado de sílica ativa é amplamente utilizado, tanto no processo úmido quanto no seco, com e sem fibras de aço (Figura 3.20A e B). A natureza coesa deste concreto projetado permite muitas aplicações que seriam difíceis, antieconômicas ou impossíveis de realizar sem a sílica ativa. O uso de sílica ativa em concreto projetado permite uma maior espessura das camadas de concreto projetado, particularmente ao atirar sobre a cabeça, e uma redução significativa no rebote.

O concreto projetado de sílica ativa frequentemente inclui fibras de aço para fornecer maior resistência à flexão.

A sílica ativa é compatível com todos os aceleradores comumente usados em concreto projetado.

Uma vez que o concreto projetado esteja no lugar, todos os benefícios esperados da sílica ativa no concreto endurecido entram em ação. Um benefício adicional é o aumento da resistência de ligação do concreto projetado de sílica ativa ao material subjacente e entre elevadores ou camadas em aplicações multipasse.



FIGURA 3.20A. Aplicação aérea de concreto projetado de sílica ativa. Por causa de sua maior coesão, o concreto projetado com sílica ativa tem muito menos rebote e permite maior espessura de elevação ao ser projetado acima do que o concreto projetado sem sílica ativa.



FIGURA 3.20B. Aplicação robótica de concreto projetado de sílica ativa para sustentação do solo. Este processo é usado com e sem fibras de aço para desempenho de flexão adicional.

3.3 SÍLICA FUME E CONSTRUTIVABILIDADE

n Concreto autoadensável (CAA). O SCC leva a trabalhabilidade do concreto plástico a um nível além da queda mensurável, mas sem segregação. O Slump Flow (ASTM C1611) é medido em vez do Slump convencional. O SCC minimiza ou elimina a necessidade de consolidar o concreto por meios mecânicos, tornando-o ideal para situações difíceis de colocação. A alta trabalhabilidade oferece uma variedade de vantagens de colocação, desde a descarga acelerada de caminhões de concreto até o bombeamento contínuo de longa distância. O SCC pode preencher toda a fôrma de parede ou coluna rapidamente. Esta prática reduz o potencial de juntas frias, especialmente em colocações de maior volume. (Ao preencher formas verticais, deve-se prestar atenção ao projeto de cofragem para suportar carga hidráulica total.) O uso de sílica ativa em um projeto de mistura SCC melhora a coesão para evitar a segregação entre pasta e agregado graúdo e pode ser usado como uma ferramenta para modificar a viscosidade SCC. Como o SCC é normalmente usado em aplicações de concreto de alto desempenho, a adição de sílica ativa leva a resistências mais altas e outras propriedades de concreto endurecido aprimoradas. Uma mistura SCC usando sílica ativa é mostrada no Capítulo 5.

3.4 SÍLICA FUME E ULTRA-ALTO DESEMPENHO CONCRETO (UHPC)

O UHPC é um material de concreto relativamente novo que abrange melhorias na resistência e durabilidade do concreto. Conforme discutido na Seção 3.5, esses aumentos também levam a aumentos na sustentabilidade. Este material está sendo usado em novas construções e reparos de existentes estruturas.

ASTM C1856, *Prática padrão para fabricação e teste de amostras de concreto de desempenho ultra-alto*, define UHPC como concreto que produz uma resistência à compressão superior a 120 MPa com outras propriedades que atendem aos requisitos especificados de durabilidade, ductilidade e tenacidade. Um alto teor de materiais cimentícios, muitas vezes incluindo grandes proporções de sílica ativa, em conjunto com um w/cm muito baixo (normalmente \bar{y} 0,22) é frequentemente usado para atingir valores de resistência à compressão de até 200 MPa aos 28 dias de idade. O uso de 1 a 3 por cento de teor de fibra (tanto de aço quanto de polímero) pode permitir que o UHPC seja usado sem reforço de aço convencional. O tamanho máximo do agregado de menos de 5 mm e dosagens muito altas de HRWRA fornecem trabalhabilidade adequada para produzir um compósito altamente coeso, mas autoconsolidante, que pode ser usado em aplicações especiais de grande volume.

El-Tawil e associados (El-Tawil, et al. 2020) apontam que muitos projetos de UHPC foram realizados até o momento usando misturas proprietárias. Eles defendem misturas abertas que podem ser produzidas por produtores de concreto pré-moldado ou fornecedores de concreto pré-misturado. Uma de suas misturas genéricas para UHPC é mostrada na Tabela 3.3.

TABELA 3.3

PROPORÇÕES DA MISTURA GENÉRICA PARA UHPC.	
MATERIAL	MASSA, kg/m ³
cimento Portland	387
cimento de escória	387
sílica ativa	194
Areia fina, 80-200 μ m	236
Areia grossa, 400 a 800 μ m	943
Água ($w/cm = 0,17$)	164
Aditivo redutor de água de alto alcance (<i>Nota 1</i>)	—
Fibras de aço (2 por cento em volume)	157

(El-Tawil, et al. 2020)

Nota 1. 1,5 a 3,0 por cento em peso de materiais cimentícios. Ajuste para obter a trabalhabilidade adequada.

3.4 SÍLICA FUME E ULTRA-ALTO DESEMPENHO CONCRETO (UHPC)

Nos EUA, um dos principais proponentes do uso de UHPC é a Federal Highway Administration (FHWA). Essa agência pesquisa e promove o uso de UHPC desde o início dos anos 2000. Em 2022, a FHWA publicou um resumo das recomendações para o uso de UHPC para preservação e reparo de pontes (FHWA 2022). Este documento fornece detalhes de projeto e construção e exemplos de projetos, incluindo:

n Revestimentos de tabuleiros

de pontes n Lajes de ligação para substituir juntas em vãos simplesmente apoiados Figuras 3.21 A, B,

C n Reparação de extremidades de vigas de

aço Figura 3.22 n

Retrofit sísmico n Reparação de colunas e painéis de parede danificados por corrosão

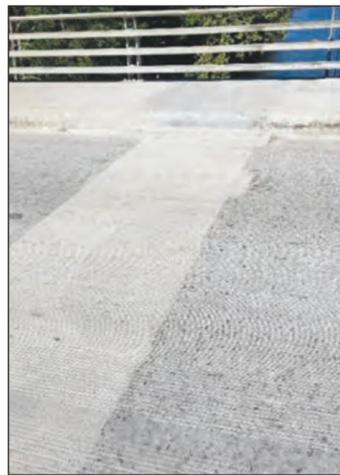
Este relatório discute misturas UHPC proprietárias e de código aberto. Orientações para especificar o desempenho concreto também estão incluídas.



A



B



C

FIGURA 3.21A, B e C. Reparo de uma ponte danificada usando uma laje de ligação UHPC. Da esquerda para a direita: A. Remoção de concreto deteriorado; B. Laje de ligação preparada para colocação; e C. Reparação concluída. (FHWA 2022) (fotos com direitos autorais 2020 NYSDOT. Usado com permissão.)

3.4 SÍLICA FUME E ULTRA-ALTO DESEMPENHO CONCRETO (UHPC)



FIGURA 3.22. Fim da viga da ponte de aço após reparo usando UHPC. (FHWA 2022)

3.4 SÍLICA FUME E ULTRA-ALTO DESEMPENHO CONCRETO (UHPC)

Outra área de interesse para o FHWA tem sido o uso de UHPC para conexões fundidas em campo entre uma variedade de elementos de ponte pré-fabricados. Essas aplicações incluem conexões entre painéis de convés pré-moldados (Figura 3.23), painéis e vigas de convés, pilares pré-moldados e vigas caixão adjacentes (FHWA 2019). elementos pré-fabricados foram concluídos nos Estados Unidos.



FIGURA 3.23. Colocação de UHPC entre painéis de convés pré-moldados adjacentes. (FHWA 2019)

3.4 SÍLICA FUME E ULTRA-ALTO DESEMPENHO CONCRETO (UHPC)

Fora dos EUA, projetos semelhantes foram concluídos. O Viaduto Chillon, parte da rodovia suíça A 9, originalmente construído em 1960, é composto por duas vigas de concreto protendido paralelas de 2,25 km de comprimento e 12 m de largura. Depois de meio século em serviço e com seis vezes mais tráfego do que foi projetado para suportar, as inspeções revelaram que a ponte era estruturalmente deficiente com propriedades mecânicas comprometidas. Em 2015, para atender às necessidades complexas deste projeto de reabilitação, uma cobertura UHPC de 45 mm de espessura foi escolhida como a solução mais econômica e rápida para aumentar a resistência ao cisalhamento, flexão e fadiga dos 53.000 m² do tabuleiro da ponte laje. As Figuras 3.24A e B mostram o trabalho nesta ponte.



FIGURA 3.24A. Plataforma do Viaduto Chillon preparada para revestimento com concreto UHPC.



FIGURA 3.24B. UHPC sendo colocado. Observe o processo de cura imediatamente após a colocação.

3.4 SÍLICA FUME E ULTRA-ALTO DESEMPENHO CONCRETO (UHPC)

Além dos trabalhos de reparo e reabilitação, o UHPC está sendo utilizado em vigas pré-moldadas protendidas. As vantagens incluem seções transversais reduzidas, volume de concreto reduzido e vida útil mais longa. As Figuras 3.25A e B mostram o UHPC nesta aplicação.



FIGURA 3.25A. Seção transversal de uma viga pronta para receber UHPC. Observe o volume de concreto minimizado e ausência de aço de reforço secundário.



FIGURA 3.25B. A mesma viga sendo "rematada". Colocado a partir de um único ponto, as características de alto fluxo do UHPC permitem o preenchimento lateral sem vazios de maneira monolítica.

3.5 SÍLICA FUMA E SUSTENTABILIDADE

Devido à liberação de CO₂ associada à produção de clínquer de cimento Portland, a indústria do concreto tornou-se um ponto focal nos esforços globais para reduzir o CO₂. O uso de sílica ativa pode levar a uma redução significativa no CO₂ associado à construção de concreto, conforme mostrado abaixo. Mais informações sobre sustentabilidade são apresentadas no Capítulo 8. Exemplos das aplicações apresentadas nos parágrafos seguintes estão no Capítulo 3.

- n O uso de sílica ativa para produzir colunas de alta resistência reduzirá o volume de ambos concreto e armadura necessários para suportar uma determinada carga. Este benefício é visto com mais frequência em arranha-céus.
- n O uso de concreto com sílica ativa pode aumentar consideravelmente a vida útil de uma estrutura de concreto exposta a cloretos e outros produtos químicos. Além disso, o concreto de alta resistência será mais resistente à abrasão. À medida que a vida útil aumenta, menos reparos ou substituições serão necessários, economizando concreto e reduzindo o CO₂.
- n O uso de sílica ativa em conjunto com quantidades maiores de outros SCMs pode reduzir o quantidade de cimento portland necessária. Essa prática reduzirá o calor gerado e a sílica ativa fornecerá a resistência à compressão inicial necessária. As misturas de concreto mostradas na Tabela 5.4 mostram os benefícios da combinação de sílica ativa com outros SCMs para obter maior vida útil enquanto reduz consideravelmente o CO₂.
- n A combinação das práticas acima pode levar ao desenvolvimento do “Concreto de Baixo Carbono”. Este termo abrange redução de CO₂, vida útil prolongada e uso de concreto de alta resistência. Os benefícios do concreto de baixo carbono são explicados no Capítulo 8.

4 ORIENTAÇÃO ACI, PADRÃO

ESPECIFICAÇÕES E ESPECIFICAÇÕES CONCRETO DE SÍLICA FUME

ACI fornece uma discussão detalhada sobre sílica ativa em um guia da comissão. ASTM, AASHTO e CEN têm especificações para sílica ativa a ser usada em concreto.

Este capítulo revisa o ACI, ASTM, AASHTO e documentos CEN. Orientação para especificação de sílica ativa e concreto de sílica ativa é fornecido. Uma sílica ativa de referência recentemente desenvolvida, que pode ser usada para calibrar testes para os padrões, também é apresentada.

4.1 Orientação ACI	48
4.1.1 Código de Construção ACI para Concreto Estrutural ..	48
4.1.2 Orientação do Comitê	48
4.2 Especificações padrão para sílica ativa	51
4.2.1 ASTM C1240.....	52
4.2.2 AASHTO M 307	55
4.2.3 EN 13263	57
4.3 Especificando Sílica Fumo e Concreto de Sílica Fumo.....	60
4.4 Material de referência de sílica ativa	61

4.1 ORIENTAÇÃO ACI

4.1.1 Código de Construção ACI para Concreto Estrutural

A sílica ativa é aprovada para uso em concreto estrutural pela ACI 318, *Requisitos do Código de Construção para Concreto Estrutural*. Esta aprovação é feita por referência à sílica ativa conforme ASTM C1240, como um material cimentício aprovado.

4.1.2 Orientação do Comitê

A sílica ativa é coberta pela ACI pelo Comitê 234. Este comitê publicou um documento intitulado "Guia para o uso de sílica ativa em concreto" (ACI 234R-06, reprovado em 2012). (Observe que este documento está sendo atualizado. Espera-se que o documento revisado seja disponibilizado pela ACI após a publicação deste manual. Verifique a disponibilidade com a ACI.) A página de título e o índice do documento atual são mostrados na Figura 4.1. Como pode ser visto, este documento cobre todos os aspectos do uso de sílica ativa. Os leitores do Manual do usuário são incentivados a revisar o documento ACI para obter informações adicionais e estendidas, particularmente sobre os efeitos da adição de sílica ativa nas propriedades do concreto fresco e endurecido.

4.1 ORIENTAÇÃO ACI

ACI 234R-06
(Reaprovado em 2012)

Guia para o Uso de Sílica Fume em Concreto

Relatado pelo Comitê ACI 234

Per Fidjestøl
Cadeira

Anthony N. Kojundic
Secretário

James M. Aldred
Mark A. Bury
Rachel J. Detwiler
Fouad H. Fouad
William Halczak

Terence C. Holanda
R. Doug Hooton
Tarif M. Jaber
Kamal H. Khayat
VM Malhotra

Dudley R. Morgan
Jan Olek
H. Celik Ozyildirim
Michael F. Pistilli
Jean-Claude Roumain

Della M. Roy
Marco J. Scali
Michael DA Thomas
John T. Wolsiefer
Min Hong Zhang

Este relatório descreve as propriedades físicas e químicas da sílica ativa; como a sílica ativa interage com o cimento Portland; os efeitos da sílica ativa nas propriedades do concreto fresco e endurecido; aplicações típicas recentes de concreto de sílica ativa; como o concreto de sílica ativa é dosado, especificado e manuseado no campo; e áreas onde pesquisas adicionais são necessárias.

Palavras-chave: cura; durabilidade; aditivo redutor de água de alta gama; concreto de alta resistência; colocação; rachaduras por retração plástica; sílica ativa; tempo de fixação; aditivo redutor de água; trabalhabilidade.

CONTEÚDO

Capítulo 1—Introdução, p. 2 1.1—Geral

1.2—O que é

sílica ativa?

1.3—Sílica ativa versus outras formas de sílica

1.4—Usando sílica ativa em concreto 1.5

—Usando sílica ativa em cimentos misturados 1.6

—Disponibilidade mundial de sílica ativa 1.7—

Tipos de produtos de sílica ativa disponíveis 1.8—

Perigos à saúde

1.9—Impacto ambiental

Capítulo 2—Propriedades físicas e composição química da sílica ativa, p. 6

2.1—Cor

2.2—Gravidade específica

2.3—Densidade aparente

Os Relatórios, Guias e Comentários do Comitê ACI são destinados a orientação no planejamento, projeto, execução e inspeção da construção. Este documento destina-se ao uso de indivíduos competentes para avaliar o significado e as limitações de seu conteúdo e recomendações e que aceitarão a responsabilidade pela aplicação do material nele contido. O American Concrete Institute se isenta de toda e qualquer responsabilidade pelos princípios declarados. O Instituto não será responsável por qualquer perda ou dano daí decorrente.

A referência a este documento não deve ser feita em documentos contratuais. Se os itens encontrados neste documento forem desejados pelo Arquiteto/Engenheiro para fazer parte dos documentos do contrato, eles devem ser reformulados no idioma obrigatório para incorporação pelo Arquiteto/Engenheiro.

2.4—Finura, formato da partícula e tamanho excessivo do

material 2.5—Composição

química 2.6—

Cristalinidade 2.7—

Variabilidade 2.8—Relacionar propriedades físicas e químicas do desempenho em concreto 2.9

—Controle de qualidade

Capítulo 3—Mecanismos pelos quais a sílica ativa modifica a pasta de cimento, argamassa e concreto, p. 9 3.1—Geral 3.2—

Efeitos físicos

3.3—Efeitos químicos 3.4

—Modificações

microestruturais 3.5—Autodesecação e

água de hidratação 3.6—Retração autógena

(alteração de volume)

3.7—Composição química do fluido dos poros

3.8—Reações em combinação com cinza volante ou escória

granulada moída de alto-forno 3.9

—Reações com diferentes tipos de cimento Portland 3.10—Calor

de hidratação 3.11—Reações

com aditivos químicos

Capítulo 4—Efeitos da sílica ativa nas propriedades do concreto fresco, p. 17 4.1—

Exigência de água 4.2—

Trabalhabilidade 4.3

—Perda de

abatimento 4.4—Tempo

de pega 4.5—

Segregação 4.6—Escorrimento e retração

plástica 4.7—Cor do

concreto 4.8—Infiltração de ar

O ACI 234R-06 substitui o ACI 234R-96 (reaprovado em 2000) e entrou em vigor em 13 de abril de 2006.

Copyright © 2006, American Concrete Institute.

Todos os direitos reservados, incluindo direitos de reprodução e uso de qualquer forma ou por qualquer meio, incluindo a realização de cópias por qualquer processo fotográfico ou por dispositivo eletrônico ou mecânico, impresso, escrito ou oral, ou gravação para reprodução sonora ou visual ou para uso em qualquer sistema ou dispositivo de conhecimento ou recuperação, a menos que seja dada permissão por escrito dos proprietários dos direitos autorais.

FIGURA 4.1. Capa e índice do documento ACI Committee 234 sobre sílica ativa. Usado com permissão do American Concrete Institute, PO Box 9094, Farmington Hills, MI 48333. Uma cópia do documento completo pode ser adquirida na ACI: www.concrete.org.

4.1 ORIENTAÇÃO ACI

2

GUIA PARA USO DE SILICA FUMA EM CONCRETO (ACI 234R-06)

- 4.9—Densidade aparente (peso unitário) do concreto fresco
4.10—Evolução do gás hidrogênio

Capítulo 5—Efeitos da sílica ativa nas propriedades do concreto

endurecido, p. 18 5.1—Geral 5.2—

Propriedades

- mecânicas 5.3—Aspectos de durabilidade 5.4—
Propriedades diversas 5.5—Uso de sílica ativa em combinação com fibras

5.6—Uso de sílica ativa em misturas ternárias 5.7

—Variações de propriedades com relação ao tipo, fonte e forma de entrega da sílica ativa

Capítulo 6—Aplicações de sílica ativa em concreto, p. 35 6.1—Ponte Tsing

- Ma, Hong Kong 6.2—311 South Wacker Drive, Chicago 6.3—Kuala Lumpur City Center, Malásia 6.4—Kinzua Dam Stilling Basin, Estados Unidos 6.5—Stolma Bridge, Noruega 6.6—Pontes rodoviárias, Estados Unidos 6.7—
Estacionamento estruturas, Estados Unidos

Capítulo 7—Especificações, p. 38 7.1—Geral

7.2—

- Especificação de sílica ativa 7.3—
Especificação de misturas de sílica ativa 7.4—
Especificação de cimento misturado com sílica ativa 7.5—
Especificação de concreto de sílica ativa

Capítulo 8—Proporcionando misturas de concreto de sílica ativa, p. 41 8.1—

Geral 8.2—Teor de cimento e sílica ativa 8.3—Teor de água

- 8.4—Agregado 8.5
—Aditivos químicos
8.6—Proporcionamento
8.7—Misturas ternárias

Capítulo 9—Trabalhando com sílica ativa em concreto de campo, p. 45

- 9.1—Transporte e manuseio de sílica ativa e sílica produtos de mistura de cimento
9.2—Produção de concreto 9.3
—Transporte 9.4—
Colocação 9.5
—Acabamento 9.6
—Cura 9.7—
Cura acelerada

Capítulo 10—Necessidades de pesquisa, p. 48

- 10.1—Resistência ao gelo
10.2—Resistência à descamação 10.3—
Ataque por sulfato 10.4—Retração por secagem e fluência 10.5—
Corrosão do aço 10.6—Durabilidade a longo prazo

- 10.7—Reologia do concreto fresco 10.8
—Mecanismo de desenvolvimento de resistência 10.9
—Papel da sílica ativa em concretos especiais 10.10—
Efeito da sílica ativa na hidratação 10.11—
Fissuração por idade avançada

Capítulo 11—Referências, p. 49

- 11.1—Padrões e relatórios referenciados 11.2—
Referências citadas

CAPÍTULO 1—INTRODUÇÃO 1.1—Geral

A sílica ativa, subproduto da indústria do ferrosilício, é um material altamente pozolânico utilizado para melhorar as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. Pode ser adicionado diretamente ao concreto como um ingrediente individual ou em uma mistura de cimento portland e sílica ativa. O Comitê 234 da ACI estima que pelo menos 120.000 toneladas métricas (130.000 toneladas) de sílica ativa são usadas anualmente no concreto em todo o mundo. Usando esse número, mais de 6 milhões de metros cúbicos (quase 8 milhões de jardas cúbicas) de concreto de sílica ativa são colocados globalmente a cada ano.

O interesse no uso de sílica ativa resultou da aplicação estrita de medidas de poluição do ar destinadas a impedir a liberação do material na atmosfera. O uso inicial de sílica ativa em concreto foi principalmente para substituição de cimento, juntamente com aditivos redutores de água (WRAs). Eventualmente, a disponibilidade de aditivos redutores de água de alta gama (HRWRAs), muitas vezes referidos como superplastificantes) permitiu novas possibilidades para o uso de sílica ativa para produzir altos níveis de desempenho.

Este documento fornece informações básicas sobre o uso de sílica fumaça no concreto. O documento está organizado da seguinte forma: • O Capítulo 1 fornece informações gerais sobre a sílica ativa; • Capítulo 2 descreve as propriedades físicas e químicas composição da sílica ativa;

- O Capítulo 3 descreve os mecanismos pelos quais a sílica ativa modifica a pasta de cimento, a argamassa e o concreto; • O Capítulo 4 descreve os efeitos da sílica ativa em produtos frescos concreto;
- O Capítulo 5 descreve os efeitos da sílica ativa no concreto endurecido; • O Capítulo 6 mostra

como a sílica ativa tem sido usada em projetos reais. Este capítulo cobre apenas um número muito pequeno de aplicações porque o Comitê 234 da ACI está desenvolvendo um documento adicional que fornecerá históricos de casos detalhados de muitos outros projetos; • O Capítulo 7 discute especificações para sílica ativa e concreto de sílica ativa; • O Capítulo 8 apresenta uma metodologia passo a passo para dosar o concreto de sílica ativa para aplicações específicas; • O Capítulo 9 apresenta recomendações para trabalhar com

- silica ativa em concreto de campo;
- O Capítulo 10 resume as necessidades de pesquisa para o uso de sílica ativa em concreto; e • O Capítulo 11 apresenta todas as referências dos outros capítulos.

Observe que a cobertura dos Capítulos 7, 8 e 9 é um tanto breve. Mais detalhes sobre como trabalhar com concreto de sílica ativa em

Material protegido por direitos autorais do American Concrete Institute—www.concrete.org

FIGURA 4.1. Contínuo

4.2 ESPECIFICAÇÕES PADRÃO PARA SÍLICA FUME

O primeiro padrão para sílica ativa foi emitido no Canadá em 1987 e serviu de modelo para os seguintes: Noruega em 1992 e Estados Unidos (ASTM) em 1993. O padrão europeu foi publicado muito mais tarde, em 2005, devido à processo de 'harmonização' das numerosas normas nacionais dentro da comunidade européia.

Quando a sílica ativa foi introduzida pela primeira vez nos Estados Unidos, as especificações do material foram escritas para cada projeto. Desde então, especificações padronizadas foram desenvolvidas. Nos Estados Unidos, existem duas principais especificações padrão de interesse: ASTM C1240 e AASHTO M 307, *Especificação padrão para uso de sílica ativa como uma mistura mineral em concreto hidráulico de cimento, argamassa e argamassa*. Na Europa, e nas áreas que anteriormente usavam os padrões britânicos, o padrão é preparado pelo CEN (Comitê Europeu de Padronização) e é intitulado: EN 13263 *Silica Fume for Concrete*.

EN 13263 e ASTM C1240 são consideradas as duas principais normas internacionais para especificar sílica ativa para uso em concreto.

Todas essas especificações são discutidas neste capítulo. A intenção aqui é revisar os parâmetros incluídos nas especificações e o significado de cada um. ASTM C1240 e AASHTO M 307 contêm elementos obrigatórios e opcionais. EN 13263 contém apenas requisitos obrigatórios. Ambas as categorias são discutidas.

Lembre-se de que todas essas três especificações foram derivadas de especificações para outras pozolanas, como ASTM C618. Devido a esta origem, alguns dos requisitos para a sílica ativa são realmente mais apropriados para outros materiais pozolânicos. Com o tempo, esses elementos das especificações estão sendo revisados ou removidos.

Todos esses padrões presumem que o teste será realizado na sílica ativa coletada ou não densificada (definida como 'bruta' na ASTM C1240). O uso do material não densificado facilita a realização dos testes necessários. O teste é frequentemente realizado para projetos, e deve-se notar que o teste de sílica ativa densificada não dará os mesmos resultados que os testes realizados no material não densificado.

Como essas especificações padrão são frequentemente modificadas pelas organizações patrocinadoras, os leitores devem consultar a ASTM, AASHTO ou CEN para determinar a versão mais atual.

4.2 ESPECIFICAÇÕES PADRÃO PARA SÍLICA FUME

4.2.1 ASTM C1240

A versão discutida aqui é a edição 2020 da especificação. Uma cópia da capa é apresentada na Figura 4.2. Cada um dos itens obrigatórios, opcionais e somente de relatório é descrito abaixo.

Este padrão internacional foi desenvolvido de acordo com os princípios internacionalmente reconhecidos de padronização estabelecidos na Decisão sobre os Princípios para o Desenvolvimento de Padrões, Guias e Recomendações Internacionais emitidos pelo Comitê de Barreiras Técnicas ao Comércio (TBT) da Organização Mundial do Comércio.



Designação: C1240 y 20

Especificação padrão para Silica ativa usada em misturas cimentícias¹

Esta norma é emitida sob a designação fixa C1240, o número imediatamente após a designação indica o ano da adoção original ou, no caso de revisão, o ano da última revisão. Um número entre parênteses indica o ano da última reaprovação. Um epsilon sobrescrito (ε) indica uma mudança editorial desde a última revisão ou reaprovação.

1. Escopo*

1.1 Esta especificação abrange sílica ativa para uso em concreto e outros sistemas que contenham cimento hidráulico.

1.2 Nos casos de sílica ativa em pasta ou adensada, realizar os testes na sílica ativa bruta da qual esses produtos foram feitos.

1.3 As unidades indicadas no SI devem ser consideradas como padrão. Nenhuma outra unidade de medida está incluída neste padrão.

1.4 A advertência de riscos de segurança a seguir refere-se apenas às partes dos métodos de teste, Seções 10 – 19, desta especificação: *Esta norma não pretende tratar de todas as questões de segurança, se houver, associadas ao seu uso. É responsabilidade do usuário deste padrão estabelecer práticas apropriadas de segurança, saúde e meio ambiente e determinar a aplicabilidade das limitações regulatórias antes do uso.* Leia as fichas de dados de segurança dos materiais utilizados.

1.5 O texto desta norma faz referência a notas e notas de rodapé que fornecem informações explicativas. Estas notas e notas de rodapé (excluindo aquelas em tabelas) não devem ser consideradas como requisitos desta norma.

1.6 *Esta norma internacional foi desenvolvida de acordo com os princípios internacionalmente reconhecidos sobre padronização estabelecidos na Decisão sobre os Princípios para o Desenvolvimento de Normas, Guias e Recomendações Internacionais emitidas pelo Comitê de Barreiras Técnicas ao Comércio (TBT) da Organização Mundial do Comércio.*

2. Documentos de Referência 2.1

Padrões ASTM 2 Método de

Teste C109/C109M para Resistência à Compressão de Argamassas de Cimento Hidráulico (Usando Amostras de Cubo de 2 pol. ou [50 mm])

¹ Esta especificação está sob a jurisdição do Comitê ASTM C09 sobre Concreto e Agregados de Concreto e é responsabilidade direta do Subcomitê C09.24 sobre Materiais Cimentícios Suplementares.

Edição atual aprovada em 15 de janeiro de 2020. Publicada em março de 2020. Aprovada originalmente em 1993. Última edição anterior aprovada em 2015 como C1240 – 15. DOI: 10.1520/C1240-20.

² Para os padrões ASTM referenciados, visite o site da ASTM, www.astm.org, ou entre em contato com o Atendimento ao Cliente ASTM em service@astm.org. Para obter informações sobre o volume do Livro Anual de Normas ASTM, consulte a página Resumo do Documento da norma no site da ASTM.

3. Terminologia

3.1 Definições: 3.1.1

Para obter as definições dos termos usados nesta especificação, consulte a Terminologia C125 e a Terminologia C219.

3.2 Definições de termos específicos para esta norma: 3.2.1 sílica ativa, densificada, n-sílica ativa processada para aumentar a densidade a granel para facilitar o manuseio e transporte.

C114 Métodos de Teste para Análise Química de Hidráulico Cimento

C125 Terminologia relativa ao concreto e concreto Ag gregos

C135 Método de Teste para Gravidade Específica Verdadeira de Refratário Materiais por Imersão em Água

C183/C183M Prática para Amostragem e a Quantidade de Teste de Cimento Hidráulico

C185 Método de Teste para Teor de Ar de Cimento Hidráulico Argamassa

C219 Terminologia Relativa a Hidráulica e Outros Inor cimentos orgânicos

Métodos de teste C311/C311M para amostragem e teste de mosca Cinzas ou Pozolanas Naturais para Uso em Cimento Portland Concreto

C430 Método de teste para finura de cimento hidráulico pela peneira de 45 µm (nº 325) **C441/C441M** Método de teste para eficácia de pozolanas ou escória de alto-forno moída na prevenção da expansão excessiva do concreto devido à reação alcali-sílica **C494** Especificação **C494M** para Aditivos Químicos para Concreto

Método de teste C604 para gravidade específica real de refratário Materiais por Pícnometro de Comparação de Gás

C670 Prática para preparar declarações de precisão e viés para métodos de teste para materiais de construção

Especificação C1005 para Massas de Referência e Dispositivos para Determinando massa e volume para uso no físico Teste de Cimentos Hidráulicos

Método de teste C1012/C1012M para mudança de comprimento de Argamassas de Cimento Hidráulico Expostas a uma Solução de Sulfato

C1069 Método de teste para área de superfície específica de alumina ou Quartzo por Adsorção de Nitrogênio

Especificação de Desempenho C1157/C1157M para Hidráulica Cimento

C1437 Método de Teste para Fluxo de Argamassa de Cimento Hidráulico

***Uma seção Resumo das Alterações aparece no final desta norma**

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, Estados Unidos
Copyright da ASTM Int'l (todos os direitos reservados); Seg 18 de janeiro 10.06.33
EST 2021 Bakado/
impresso por Terence Holland (Concrete Terry LLC) de acordo com o Contrato de licença. Nenhuma outra reprodução autorizada.

FIGURA 4.2. Página de capa da especificação ASTM para sílica ativa. Extraído com permissão de C1240-20, *Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures*, © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428. Uma cópia do padrão completo pode ser obtida na ASTM: www.astm.org.

4.2 ESPECIFICAÇÕES PADRÃO PARA SÍLICA FUME

- n Teor de dióxido de silício (SiO₂) (obrigatório).** Este requisito exige um mínimo de SiO₂ conteúdo de 85 por cento. Como o SiO₂ é o ingrediente reativo da sílica ativa, um limite para o conteúdo é considerado apropriado. Outras especificações padrão (por exemplo, Canadá) permitem o uso de sílica ativa com teor de SiO₂ inferior a 85% após testes apropriados em concreto.
- n Teor de umidade (obrigatório).** Este requisito limita o teor máximo de umidade a 3 por cento. A intenção aqui é minimizar a quantidade de umidade que é trazida junto com a sílica ativa.
- n Perda na ignição (obrigatório).** Este requisito limita a perda máxima na ignição a 6 por cento. As cinzas volantes têm esse requisito há muitos anos devido ao potencial de partículas de carvão parcialmente queimadas serem incluídas nas cinzas volantes. Este carvão pode ter uma forma com uma área superficial muito elevada, o que aumenta significativamente a necessidade de aditivos incorporadores de ar em concretos incorporadores de ar. Não está claro se algum carvão dessa mesma natureza está presente na sílica ativa, portanto, o requisito da LOI é mais um controle sobre qualquer carvão não queimado ou outro material do forno de arco elétrico.
- n Material de tamanho grande (obrigatório).** Este requisito limita a quantidade de material de tamanho grande retido em uma peneira de 45 µm (nº 325) a um máximo de 10 por cento. Há ainda uma exigência de que a variação máxima da média não ultrapasse 5 pontos percentuais. Conforme observado no Capítulo 2, a sílica ativa é um material extremamente fino e uma análise de peneira não fornecerá nenhuma informação significativa sobre tamanho de partícula ou área de superfície. Este requisito visa minimizar a quantidade de material estranho na sílica ativa. Tal material pode incluir materiais não queimados do forno ou partículas de ferrugem do sistema de coleta de sílica ativa.
- n Atividade pozolânica acelerada (obrigatório).** Este requisito afirma que a atividade pozolânica acelerada de uma sílica ativa em sete dias deve ser de pelo menos 105 por cento do controle feito sem sílica ativa. Este requisito também é uma transferência da especificação de cinzas volantes. Este teste é realizado em uma proporção constante de água-materiais cimentícios tanto para o cimento apenas quanto para as misturas de cimento mais sílica ativa. As misturas de sílica ativa usam um superplastificante seco para atingir um valor de fluxo igual às misturas apenas de cimento.

4.2 ESPECIFICAÇÕES PADRÃO PARA SÍLICA FUME

- n Superfície específica (obrigatório).** Este requisito exige uma superfície específica mínima (área de superfície) de 15 m² /g. Conforme observado no Capítulo 2, a determinação da superfície específica para sílica ativa requer uma técnica muito sofisticada conhecida como adsorção de nitrogênio ou método "BET". Os valores obtidos a partir deste tipo de teste não são diretamente comparáveis com os métodos de teste de permeabilidade ao ar, como Blaine. A superfície específica é um parâmetro importante para sílica ativa porque quanto maior a área de superfície, menores as partículas.
- n Requisitos de uniformidade (opcional).** Este requisito limita a variação na demanda de aditivo incorporador de ar para argamassa contendo sílica ativa a um máximo de 20 por cento nos dez testes anteriores. Este teste é feito com pouca frequência e não tem muita importância para o usuário da sílica ativa. O que é mais importante é a demanda real de aditivos incorporadores de ar em concreto feito com materiais de projeto. Espera-se que a adição de sílica ativa aumente a necessidade de AEA em cerca de 50-100 por cento, dependendo da natureza e da quantidade da sílica ativa sendo adicionada e do AEA real sendo usado. Aumentos no uso de AEA fora dessa faixa ou reduções (muito raros) devem ser investigados para garantir que um sistema de esvaziamento de ar adequado esteja sendo desenvolvido.
- n Reatividade com álcalis de cimento (opcional).** Este requisito exige uma redução na expansão das barras de argamassa de 80% quando testadas em 14 dias. Conforme observado anteriormente, como a sílica ativa, usada na quantidade apropriada, é conhecida por ser muito eficaz no controle de ASR, esse limite não tem muito valor. Se a prevenção de ASR for importante em uma aplicação específica, testes apropriados com os materiais concretos do projeto real fornecerão informações muito mais significativas.
- n Expansão da resistência ao sulfato (opcional).** Este requisito estabelece limites de expansão permitidos para sílica ativa usada em aplicações de resistência ao sulfato. Os limites são apresentados para resistência moderada, alta e muito alta. Aplica-se aqui a mesma filosofia aplicada à prevenção de ASR: se a resistência ao sulfato for importante, os únicos dados significativos virão dos testes com materiais específicos do projeto.
- n Densidade aparente (somente relatório).** A densidade aparente é o peso unitário solto da sílica ativa. O teste é realizado usando uma mesa vibratória para compactar a sílica ativa. Não há limite estabelecido — o valor é informado para utilização pelo comprador da sílica ativa.
- n Densidade (somente relatório).** Densidade é o termo usado pela ASTM para a gravidade específica da sílica ativa. Não há limite estabelecido — o valor é informado para utilização pelo comprador da sílica ativa.

4.2 ESPECIFICAÇÕES PADRÃO PARA SÍLICA FUME

n Total de álcalis (somente relatório). Não há limite estabelecido para álcalis totais - o valor é relatado para uso pelo comprador da sílica ativa. Relatar o total de álcalis era originalmente um requisito obrigatório derivado da especificação de cinzas volantes. Dado o baixo teor alcalino e a quantidade relativamente pequena de sílica ativa em um metro cúbico de concreto, quaisquer álcalis contribuídos pela sílica ativa geralmente não são incluídos no conteúdo alcalino total do concreto. ASTM C1778 não requer a inclusão de quaisquer álcalis além daqueles contribuídos pelo cimento portland no cálculo total de álcalis. Se a prevenção de ASR for importante em uma aplicação específica, testes apropriados com os materiais concretos do projeto real fornecerão informações muito mais significativas do que saber o conteúdo alcalino da sílica ativa.

4.2.2 AASHTO M 307

A AASHTO desenvolveu uma especificação padrão para sílica ativa antes da ASTM. A versão atual da AASHTO é M 307, 2013. Uma cópia da capa deste documento está na Figura 4.3.

A AASHTO revisou sua especificação para conter essencialmente os mesmos requisitos da especificação ASTM. O documento revisado tem uma designação dupla de AASHTO M 307 e ASTM C1240. Como os requisitos da AASHTO geralmente são os mesmos da ASTM, eles não são descritos em detalhes neste documento.

Devido às diferenças no tempo das cédulas entre ASTM e AASHTO, pode-se esperar que existam diferenças entre os dois padrões em edições futuras. Certifique-se de estar se referindo ao padrão correto da organização apropriada para o seu projeto.

4.2 ESPECIFICAÇÕES PADRÃO PARA SÍLICA FUME

Especificação padrão para

Sílica ativa usada em misturas cimentícias

Designação AASHTO: M 307-13 (2021)

Revisado tecnicamente: 2020 Revisado, mas não atualizado: 2021

Subcomitê Técnico: 3b, Concreto Fresco

Designação ASTM: C1240-15



1. ESCOPO

1.1. Esta especificação abrange a sílica ativa para uso em concreto e outros sistemas que contenham cimento.

1.2. Nos casos de sílica ativa em pasta ou densificada, realizar os testes na sílica ativa bruta a partir da qual esses produtos foram feitos.

1.3. Os valores declarados em unidades SI devem ser considerados como padrão. Os valores indicados entre parênteses são apenas para informação.

1.4. A seguinte advertência sobre riscos de segurança refere-se apenas às partes dos métodos de teste, Seção 10, desta especificação: *Esta norma não pretende tratar de todas as questões de segurança, se houver, associadas ao seu uso. É responsabilidade do usuário deste padrão estabelecer práticas apropriadas de segurança e saúde e determinar a aplicabilidade das limitações regulatórias antes do uso. Leia as fichas de dados de segurança dos materiais utilizados.*

1.5. O texto desta norma faz referência a notas e notas de rodapé que fornecem informações explicativas. Estas notas e notas de rodapé (excluindo aquelas em tabelas) não devem ser consideradas como requisitos desta norma.

2. DOCUMENTOS REFERENCIADOS

2.1. *Padrões AASHTO:*

ÿ M 194M/M 194, Aditivos Químicos para Concreto ÿ R 71,
Amostragem e Quantidade de Testes de Cimento Hidráulico ÿ T 105,
Análise Química de Cimento Hidráulico ÿ T 106M/T 106,
Resistência à Compressão de Argamassa de Cimento Hidráulico (Usando 50 mm ou 2 pol.
Amostras de cubo)
ÿ T 137, Teor de Ar da Argamassa de Cimento Hidráulico ÿ
T 192, Finura do Cimento Hidráulico pela Peneira de 45 µm (No. 325)

2.2. *Normas ASTM:*

ÿ C125, Terminologia padrão relativa a concreto e agregados de concreto ÿ C135, Método de teste padrão para gravidade específica real de materiais refratários por água Imersão
ÿ C219, Terminologia padrão relativa a cimentos hidráulicos e outros inorgânicos

TS-3b

M 307-1

AASHTO

© 2021 pela American Association of State Highway and Transportation Officials.
Todos os direitos reservados. A duplicação é uma violação da lei aplicável.

FIGURA 4.3. Página de capa da especificação AASHTO para sílica ativa. Da *especificação padrão para materiais de transporte e métodos de teste*, © 2004, pela Associação Americana de Oficiais de Rodovias e Transportes Estaduais, Washington, DC Usado com permissão. Os documentos podem ser adquiridos na livraria em 1-800-231-3475 ou online em <http://bookstore.transportation.org>.

4.2 ESPECIFICAÇÕES PADRÃO PARA SÍLICA FUME

4.2.3 EN 13263

Esta norma é da responsabilidade do Comité Europeu de Normalização (CEN). A norma europeia é constituída por duas partes: Parte 1: Definições, requisitos e critérios de conformidade; e Parte 2: Avaliação da conformidade. Os critérios para a parte 1 e a parte 2 devem ser atendidos para que a sílica ativa esteja em conformidade com o padrão. Esta norma foi desenvolvida, de forma semelhante à ASTM, a partir da norma para cinzas volantes. Um adendo foi adicionado em 2009, permitindo uma segunda classe de sílica ativa com um teor de dióxido de silício menor do que o material padrão original. Isso era para produtos já em uso em algumas aplicações menores.

Ele é revisado a cada 5 anos e em 2020 foi aprovado para uso contínuo sem nenhuma revisão. A EN 13263 continuará a ser usada no Reino Unido após a separação da União Europeia. Os padrões europeus são 'harmonizados' em todos os países que fazem parte da grande Comunidade Económica Europeia, portanto, a EN 13263 permanecerá como um padrão europeu e internacional para sílica ativa. Ao contrário das duas normas americanas, a EN 13263 contém apenas critérios de teste obrigatórios. Os padrões ASTM e EN são comparados na Tabela 4.1. Uma cópia da capa deste documento está na Figura 4.4.

4.2 ESPECIFICAÇÕES PADRÃO PARA SÍLICA FUME

TABELA 4.1

COMPARAÇÃO DE ASTM C1240 E EN 13263				
COMPONENTE/ CRITÉRIO	americano ASTM C1240-20	Europeia EN 13263.05 +A1.09	TESTE FREQUÊNCIA	ADICIONAL INFORMAÇÃO
SiO ₂ (porcentagem)	> 85	> 85/80	Semanalmente	Na versão EN, o produto Classe b) em >80 por cento é de uso muito baixo em aplicações específicas.
SO ₃ (porcentagem)	—	< 2,0	Semanalmente	Para abordar o potencial de expansão do sulfato.
Cl (porcentagem)	—	< 0,3	Por mês	Para reduzir o potencial de corrosão do aço causada por cloretos no concreto.
CaO livre (porcentagem)	—	< 1,0	Semanalmente	Para controlar o potencial de conversão em carbonato de cálcio (carbonatação)
Si Livre (porcentagem)	—	< 0,4	Por mês	—
Álcalis disponíveis: NaO ₂ eq. (por cento)	Relatório	Relatório	Semanalmente	—
Umidade (porcentagem)	< 3,0	- Semanalmente		—
Perda na Ignição (porcentagem)	< 6,0	< 4,0	—	—
Superfície Específica (m ² /g)	> 15	15 - 35	Por mês	—
Densidade a granel u/dens (kg/m ³)	Relatório	—	Diário	—
Atividade Pozolânica > 105 em 7d > 100 em 28d Índice Mensal (porcentagem) acc. cura padrão. cura				—
Resíduo de peneira de 45 microns (porcentagem)	< 10	- Semanalmente		—

Apenas os testes obrigatórios para conformidade com as normas são mostrados. A SFA não acredita que as diferenças nas propriedades testadas ou diferenças nos limites estabelecidos pelas duas normas sejam significativas. Essas diferenças não refletirão o desempenho da sílica ativa no concreto. Observe que a frequência dos testes se aplica apenas a EN13263.

4.2 ESPECIFICAÇÕES PADRÃO PARA SÍLICA FUME

<p>EUROPEAN STANDARD NORME EUROPÉENNE EUROPÄISCHE NORM</p>	<p>EN 13263-1 June 2005</p>
<p>ICS 91.100.30</p> <p>English version</p> <p>Silica fume for concrete - Part 1: Definitions, requirements and conformity criteria</p>	
<p>Fumée de silice pour béton - Partie 1: Définitions, exigences et critères de conformité</p>	<p>Silikastraub für Beton - Teil 1: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien</p>
<p>This European Standard was approved by CEN on 19 May 2005.</p> <p>CEN members are bound to comply with the CEN/CENELEC Internal Regulations which stipulate the conditions for giving this European Standard the status of a national standard without any alteration. Up-to-date lists and bibliographical references concerning such national standards may be obtained on application to the Central Secretariat or to any CEN member.</p> <p>This European Standard exists in three official versions (English, French, German). A version in any other language made by translation under the responsibility of a CEN member into its own language and notified to the Central Secretariat has the same status as the official versions.</p> <p>CEN members are the national standards bodies of Austria, Belgium, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland and United Kingdom.</p>	
<p>Contents</p>	<p>Page</p>
Foreword	3
Introduction	4
1 Scope	5
2 Normative references	5
3 Terms and definitions	5
4 Health, hygiene and environment	9
5 Specifications	9
5.1 General	9
5.2 Chemical requirements	10
5.3 Physical requirements	10
6 Packaging, labelling and marking	11
7 Conformity criteria	11
7.1 Autocontrol testing	11
7.2 Conformity criteria for physical and chemical properties and evaluation procedure	12
Annex A (normative) Release of dangerous substances and emission of radioactivity	16
Annex ZA (informative) Clauses of this European Standard addressing the provisions of the EU Construction Products Directive	17
Bibliography	23



EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION
EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG

Management Centre: rue de Stassart, 36 B-1050 Brussels

© 2005 CEN All rights of exploitation in any form and by any means reserved worldwide for CEN national Members. Ref. No. EN 13263-1:2005: E

FIGURA 4.4. Página de capa do EN 13263. Usado com permissão do Comitê Europeu de Padronização (CEN.) Cada país europeu que está usando os Padrões CEN pode publicar sua própria versão – portanto, NS EN 13263 para a Noruega; BS EN 13263 para o Reino Unido, etc. O CEN é o local singular para a especificação genérica. O site do CEN pode ser acessado em: <https://standards.cen.eu>.

4.3 ESPECIFICAÇÃO DE SÍLICA FUMA E CONCRETO DE SÍLICA FUMA

Para especificar a sílica ativa, é melhor consultar uma das especificações padrão descritas anteriormente neste capítulo. Não invoque nenhum dos requisitos opcionais nestas especificações, a menos que haja uma necessidade específica de fazê-lo. Se houver requisitos de projeto específicos para a sílica ativa, inclua esses requisitos além dos requisitos da especificação padrão. Por exemplo, se você deseja uma quantidade específica de sílica ativa em um saco grande para facilitar a dosagem, inclua esse requisito junto com os requisitos gerais da ASTM C1240.

Existem três opções principais quando se trata de especificar o concreto de sílica ativa:

1. Desenvolver uma especificação seguindo o formato utilizado pela AASHTO; **2.**

Desenvolva uma especificação usando um formato ao longo das linhas da especificação de três partes conforme desenvolvido pelo Construction Specifications Institute (CSI) e utilizado pela American Instituto do Concreto;

3. Desenvolva uma especificação usando o formato desenvolvido por uma organização específica.

A AASHTO aborda a construção de concreto para pontes nas especificações de construção de pontes AASHTO LFRD (Projeto de fator de resistência e carga), quarta edição (AASHTO 2019). e nas especificações de projeto de ponte AASHTO LRFD, nona edição, (AASHTO 2020). O uso de concreto de sílica ativa está incluído nesses documentos. Se você estiver desenvolvendo especificações para um projeto de transporte, revise os requisitos da AASHTO para seu projeto específico.

Sob o formato CSI, o trabalho concreto está incluído na Divisão 3 da especificação geral do projeto.

Nesse formato, o concreto moldado no local é geralmente designado como Seção 033000.

Normalmente, os especificadores criarão uma seção separada para o concreto de sílica ativa que incluirá todos os requisitos específicos para o concreto de sílica ativa.

Muitas organizações desenvolveram seu próprio formato para especificações. Existe uma gama muito ampla de formatos de especificação que têm sido usados.

Independentemente do formato selecionado, o SFA recomenda fortemente que as especificações sejam baseadas nas necessidades de desempenho de concreto exigidas, em vez de parâmetros de mistura prescritivos. Deixe o produtor de concreto desenvolver uma mistura que melhor atenda aos requisitos impostos ao concreto.

4.4 MATERIAL DE REFERÊNCIA DE SÍLICA FUME

Diferentes laboratórios encontraram dificuldades ao testar sílica ativa para conformidade com ASTM C1240 ou AASHTO M 307. Para reduzir essas dificuldades, um material de referência de sílica ativa foi preparado pela SFA em cooperação com o Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos (NIST). Este material é uma sílica ativa de características conhecidas, que pode ser utilizada por laboratórios para calibração de seus testes internos. A sílica ativa de referência foi testada por vários laboratórios e os valores foram determinados para vários parâmetros. Esses parâmetros incluem o teor de SiO₂, a área de superfície específica por BET, o teor de umidade, a perda por ignição e a quantidade de vários oligoelementos que podem estar presentes. Aparentemente, não há outro material de referência padrão disponível internacionalmente.

A Figura 4.5 mostra um pacote da sílica ativa de referência. Este material de referência é designado SRM 2696 e está disponível no Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST) a um custo nominal. Verifique o site da SFA (www.silicafume.org) ou o site do NIST (<https://srms.nist.gov/index.cfm>) para obter instruções sobre como obter este material.



FIGURA 4.5. Material de referência padrão de sílica ativa (SRM 2696) disponível no National Institute for Standards and Technology. Verifique os sites da SFA ou do NIST, conforme listado no texto, para obter instruções sobre como solicitar este material.

5 PROPORCIONAMENTO DE SÍLICA-FUMA CONCRETO

A dosagem do concreto de sílica ativa é muito semelhante à dosagem de qualquer outra mistura de concreto. No entanto, existem algumas diferenças, particularmente como a água é controlada e como o abatimento é alcançado. A melhor abordagem é começar com uma mistura de desempenho conhecido. Uma vez que o desempenho dessa mistura é estabelecido usando materiais de projeto, a mistura pode ser ajustada conforme necessário.

Este capítulo analisa a dosagem em geral e, em seguida, apresenta um procedimento passo a passo para a dosagem de concreto de sílica ativa. Vários exemplos de dosagem de misturas de sílica ativa para aplicações específicas são apresentados. O capítulo termina com uma discussão de conceitos avançados que podem ser apropriados para dosar misturas com requisitos complexos.

5.1 Considerações Básicas.....	63
5.2 Requisitos do Projeto	66
5.3 Considerações de Construção	67
5.4 Procedimento de Proporção	70
5.4.1 Regras Gerais	70
5.4.2 Procedimento Passo-a-Passo	72
5.5 Ajustando a Mistura.....	84
5.6 Exemplos de Dosagem de Mistura.....	85
5.6.1 Exemplo 1 – Plataforma da Ponte.....	85
5.6.2 Exemplo 2 – Estrutura de estacionamento moldada no local	88
5.6.3 Exemplo 3 – Colunas de Concreto de Alta Resistência	91
5.7 Considerações Adicionais para a Mistura	
Doseamento	94
5.7.1 Empacotamento de Partículas	94
5.7.2 Modificando a Viscosidade	94
5.7.3 Abordagem Estatística para Misturas Complexas	95

5.1 CONSIDERAÇÕES BÁSICAS

A seguir estão várias considerações básicas a serem lembradas ao dosar sílica ativa concreto:

Na maioria dos casos, a sílica ativa não é comprada diretamente. Quando a sílica ativa for especificada, ela simplesmente virá como um ingrediente do concreto. Os produtores de sílica ativa firmaram acordos de marketing com os principais fornecedores de aditivos. Esses arranjos permitem que o produtor de concreto compre sílica ativa e aditivos químicos do mesmo fornecedor. É responsabilidade do fornecedor de concreto obter sílica ativa que atenda às especificações do projeto e dimensionar o concreto para atender aos requisitos de concreto especificados.

Os fundamentos das boas práticas de concreto se aplicam ao concreto de sílica ativa da mesma forma que a qualquer outro concreto. Na verdade, a violação das boas práticas aparecerá mais facilmente no concreto de sílica ativa simplesmente por causa do alto desempenho normalmente especificado. Algumas das áreas de boas práticas são:

- Controlar o peso de todos os ingredientes ■

- Monitorar o teor de umidade dos agregados ■
- Controlar o teor de ar

- Não use cloreto ou ingredientes contendo cloreto como acelerador ■
- Preste atenção às considerações de clima quente e frio

Use o bom senso em relação ao desempenho do concreto - não espere que o concreto de sílica ativa se comporte de maneira tão diferente do concreto convencional. Se o que está acontecendo não fizer sentido, peça ajuda a alguém experiente com o material.

Trabalhe para um conteúdo fixo de materiais cimentícios e uma proporção fixa de água para material cimentício (w/cm). Esta prática geralmente não é o caso do concreto de sílica ativa porque resultará em teores muito altos de materiais cimentícios. Tanto a quantidade total de materiais cimentícios quanto o teor máximo de água serão frequentemente especificados.

Haverá água suficiente para hidratar o cimento? Esta pergunta é feita com frequência. Não se preocupe se há água suficiente. Misturas de concreto com w/cm inferior a 0,25 atingiram resistência à compressão acima de 120 MPa. Se o cimento não estiver hidratado, ele servirá como material de enchimento para preencher os vazios da mistura.

5.1 CONSIDERAÇÕES BÁSICAS

Alguns especificadores se sentem desconfortáveis em usar um superplastificante sem primeiro verificar uma queda de água de 50 a 75 mm. Este requisito está desatualizado, mas ainda é visto em muitas especificações. Para muitas aplicações de concreto de alto desempenho, a w/cm será tão baixa que não haverá água suficiente para obter um abatimento mensurável e ainda desenvolver um concreto com as características de desempenho desejadas. Além disso, os superplastificantes que agora estão disponíveis devem ser adicionados à água do lote para máxima eficiência. Os especificadores são incentivados a trabalhar com produtores de concreto e fornecedores de aditivos para obter as propriedades de concreto necessárias, em vez de se preocuparem com um limite de abatimento.

Use misturas químicas para obter a queda adequada para a colocação. Normalmente, tanto um redutor de água (configuração normal ou retardante) quanto um superplastificante serão usados. Se forem usados vários aditivos, siga as instruções do fornecedor do aditivo quanto à sequência e tempo de adição.

Em alguns casos, pode ser necessário ir além dos limites recomendados pelos fabricantes para dosagens de misturas químicas, particularmente para superplastificantes. Para concreto de alta resistência com w/cm muito baixo, a dose necessária pode ser até o dobro da dosagem recomendada e em UHPC pode ser várias vezes a recomendada. O teste nas dosagens propostas de aditivo é recomendado para garantir que outras propriedades, como tempo de presa, conteúdo de ar e taxa de desenvolvimento de resistência, não sejam afetadas.

O ar aprisionado é necessário com concreto de sílica ativa se for exposto ao congelamento e descongelamento durante a construção ou serviço. Use a quantidade de ar recomendada em documentos padrão para concreto convencional, como ACI 211.1, *Prática Padrão para Seleção de Proporções para Concreto Normal, Pesado e Massa*, ou ACI 318, (consulte a Tabela 5.1.) ACI 318 e a maioria das especificações permite um redução percentual no teor de ar se a resistência à compressão for superior a 35 MPa; quase sempre será o caso do concreto de sílica ativa.

5.1 CONSIDERAÇÕES BÁSICAS

TABELA 5.1

CONTEÚDO DE AR TOTAL RECOMENDADO PARA CONCRETO EXPOSTO A CONGELAMENTO E DESCONGELAMENTO (De ACI 318)			
TAMANHO AGREGADO MÁXIMO NOMINAL		PORCENTO DE CONTEÚDO DE AR	
milímetros	em.	EXPOSIÇÃO GRAVE	EXPOSIÇÃO MODERADA
9.5	3/8	7.5	6
12.5	1/2	7	5.5
19	3/4	6	5
25	1	6	4.5
37,5	1 1/2	5.5	4.5
50	2	5	4
75	3	4.5	3.5

Espere usar um pouco mais de aditivo incorporador de ar (AEA) do que o normal para concreto de sílica ativa.

Uma vez estabelecida a quantidade adequada de AEA, não haverá mais ou menos problemas de controle de ar para este concreto do que para concreto sem sílica ativa.

Use o maior agregado permitido para a aplicação e a resistência especificada. Na maioria dos casos, um agregado de 19 mm será apropriado. Só porque um concreto de alta resistência é necessário não significa necessariamente que um agregado menor deva ser usado. Além disso, tente usar o máximo possível de agregado graúdo para reduzir a retração por secagem desses concretos. Muitos concretos de sílica ativa são levemente lixados quando comparados a concretos sem sílica ativa.

5.2 REQUISITOS DO PROJETO

É essencial entender os requisitos para um determinado projeto. Embora isso possa parecer uma afirmação óbvia, ela precisa ser dita. Normalmente, todos os requisitos do projeto serão especificados nas especificações. Reserve um tempo para ler toda a especificação de concreto para ter certeza de que todos os requisitos foram atendidos. Não é incomum encontrar requisitos de encolhimento, parâmetros de vácuo de ar endurecido e permeabilidade de cloreto, além da resistência à compressão. Também pode haver requisitos incomuns para as informações a serem apresentadas no momento da aprovação da mistura de concreto.

Se houver alguma dúvida sobre os requisitos do projeto, especialmente se alguns dos requisitos parecerem contraditórios, certifique-se de buscar esclarecimentos com o especificador.

É sempre mais fácil e mais barato obter respostas às perguntas antes do que depois que a mistura de concreto é desenvolvida.

5.3 CONSIDERAÇÕES DE CONSTRUÇÃO

Uma vez identificados os requisitos do projeto, é fundamental determinar os requisitos do empreiteiro que colocará o concreto. Aqui estão alguns tópicos a serem considerados:

Slump: O concreto fresco de sílica ativa é muito coesivo e se comporta de maneira um pouco diferente do concreto convencional. Um determinado abatimento não será indicativo da mesma trabalhabilidade para concreto com e sem sílica ativa. Uma boa regra para concreto de sílica ativa é colocar o mais alto possível para a colocação. Normalmente, o abatimento para o concreto de sílica ativa deve ser aumentado em cerca de 50 mm sobre o concreto sem sílica ativa para obter a mesma trabalhabilidade.

Para concreto contendo mais de 6% de sílica ativa, recomenda-se um abatimento mínimo de 200 mm.

Usar um abatimento mais alto facilitará o fechamento da superfície e a obtenção do acabamento desejado. Frequentemente, para tabuleiros de pontes ou estruturas planas de estacionamento, a queda será determinada pelo grau da colocação. Devido à sua maior coesão, o concreto de sílica ativa se mantém muito melhor em encostas do que o concreto sem sílica ativa, mesmo quando vibrado. Sempre coloque na queda mais alta que aguentará na inclinação.

A Figura 5.1 mostra o concreto de sílica ativa sendo colocado na cúpula de um tanque de águas residuais em Jacksonville, Flórida. O concreto tinha um abatimento de aproximadamente 200 mm (Figura 5.2) e manteve o abatimento durante a vibração em uma superfície significativamente inclinada. Este projeto não tinha sílica ativa no concreto inicialmente. O empreiteiro optou por usar sílica ativa para aproveitar a maior capacidade de manter o talude. Como benefício colateral, devido à alta reatividade do concreto de sílica ativa, um revestimento de membrana foi aplicado no interior do tanque de concreto em 7 dias, em vez de esperar 28 dias.

5.3 CONSIDERAÇÕES DE CONSTRUÇÃO



FIGURA 5.1. Concreto de sílica ativa sendo colocado na cúpula inclinada de um tanque de tratamento de águas residuais. Observe o concreto coesivo segurando o talude durante a vibração.



FIGURA 5.2. O abatimento do concreto colocado na cúpula do tanque foi de aproximadamente 200 mm.

5.3 CONSIDERAÇÕES DE CONSTRUÇÃO

Outras questões: Determine quaisquer outros requisitos específicos de colocação ou acabamento que o empreiteiro possa ter. Quanto mais informações estiverem disponíveis antes de dosar o concreto, mais rápido e fácil será desenvolver uma mistura adequada.

Frequentemente, os requisitos do especificador e os requisitos do empreiteiro podem parecer conflitantes. Por exemplo, um requisito para um teor de água muito baixo não se presta a um concreto de alto abatimento. Diferenças como essa podem frequentemente ser resolvidas usando tipos e quantidades adequadas de misturas químicas.

5.4 PROCEDIMENTO DE PROPORCIONAMENTO

As proporções para o concreto de sílica ativa são normalmente desenvolvidas para atender aos requisitos específicos do projeto. Esses requisitos podem ser de natureza prescritiva, fornecendo detalhes sobre as proporções da mistura, ou podem ser puramente de desempenho, fornecendo apenas os requisitos que devem ser atendidos. Em ambos os casos, é melhor seguir um procedimento passo a passo para desenvolver as proporções da mistura para um projeto específico.

5.4.1 Regras Gerais

Não existe um método "científico" para dosagem. Isso significa que não há um gráfico que possa ser usado para derivar os ingredientes da mistura para atender a um nível de desempenho especificado. Existem simplesmente muitas variáveis para que tal gráfico seja desenvolvido. No entanto, há décadas de aplicações de projetos que fornecem um bom resumo das várias porcentagens de sílica ativa usadas e as propriedades resultantes do concreto endurecido. A Tabela 5.2 mostra um resumo dos conteúdos e propriedades de sílica ativa que são normalmente obtidos. As seções a seguir fornecem regras gerais para dosagem.

TABELA 5.2

CONTEÚDOS TÍPICOS DE SÍLICA-FUMA VERSUS PROPRIEDADES DO CONCRETO			
SÍLICA FUME CONTENTE (Em massa de cimento)	MISTURA DE CONCRETO, Material cimentício total e w/cm	RÁPIDO RESULTADOS DE CLORETO ASTM C1202	COMPRESSIVO FORÇA, 28 dias
0 por cento	386 kg/m ³ w/cm < 0,40	> 3000 coulombs	35 MPa
5-10 por cento	386 kg/m ³ w/cm < 0,40	< 1000 coulombs	> 50 MPa
> 10 por cento	386 kg/m ³ w/cm < 0,40	< 500 coulombs	> 65 MPa
> 15 por cento	475 kg/m ³ w/cm < 0,35	< 300 coulombs	> 85 MPa

5.4 PROCEDIMENTO DE PROPORCIONAMENTO

Especificações prescritivas: Muitos DOTs especificam proporções de mistura de concreto a serem usadas para todos os projetos semelhantes. Este procedimento pode causar diferenças de desempenho de projeto para projeto porque o desempenho do concreto de sílica ativa depende da interação dos materiais específicos utilizados. Neste caso, siga as proporções prescritivas e teste para verificar se as propriedades aceitáveis do concreto endurecido são alcançadas.

Especificações de desempenho: Se a especificação for baseada em desempenho, lembre-se de que os materiais locais determinarão o desempenho final da mistura. Não assuma que uma mistura desenvolvida e usada em outro lugar fornecerá os mesmos resultados quando materiais locais são usados. Misturas usadas em outros lugares são excelentes pontos de partida, mas a influência dos materiais do projeto nos resultados obtidos deve ser determinada. Para uma especificação de desempenho, a SFA recomenda o desenvolvimento de uma mistura após a identificação dos materiais do projeto.

Teste tanto em laboratório quanto em escala de produção durante o desenvolvimento da mistura. O processo é muito complexo para prever qual será o resultado sem testes apropriados. Reserve bastante tempo para os testes necessários.

Finalmente, siga o procedimento descrito na seção a seguir. Este procedimento evoluiu ao longo de muitos anos e é a melhor recomendação atualmente disponível.

5.4 PROCEDIMENTO DE PROPORCIONAMENTO

5.4.2 Procedimento passo a passo

Esta seção apresenta um procedimento de sete etapas. Exemplos são dados para cada etapa. Veja a Figura 5.3 para um resumo deste procedimento.

PASSO 1

Determinar os requisitos do projeto. Leia atentamente as especificações. Procure requisitos não apenas para o desempenho do concreto, mas também para a dosagem do concreto. Itens para procurar incluem:

n Requisitos de resistência à compressão em vários estágios de construção n Exposição a cloretos n Exposição ao congelamento e degelo, incluindo teor de ar especificado n Requisitos agregados, incluindo tamanho máximo nominal n Exposição química n Resistência à abrasão

n Restrições de temperatura n Teor máximo de água

n Conteúdo de materiais cimentícios

n Porcentagens de cinzas volantes, cimento de escória e sílica ativa

n Abatimento

PASSO 2

Coordene com o empreiteiro que colocará o concreto. Economize tempo e despesas obtendo informações do empreiteiro no início do processo. Saber o que o empreiteiro precisa para colocar o concreto no lugar também ajudará o produtor a especificar o concreto corretamente. Os itens a serem considerados aqui incluem:

n Requisitos especiais de construtibilidade n Métodos

de colocação e acabamento n Tamanho

nominal máximo permitido do agregado n Requisitos de

abatimento — não se esqueça de aumentar o abatimento para concreto de sílica ativa n Responsabilidade pela adição de aditivos no local, se necessário

ETAPA 3

Selecione a mistura inicial. A Tabela 5.3 contém várias misturas de concreto de sílica ativa que foram desenvolvidas para uma variedade de aplicações. Se as especificações do projeto não incluírem detalhes sobre a mistura, use esta tabela para encontrar uma mistura de concreto que atenda aos requisitos semelhantes aos do projeto atual.

5.4 PROCEDIMIENTO DE PROPORCIONAMENTO

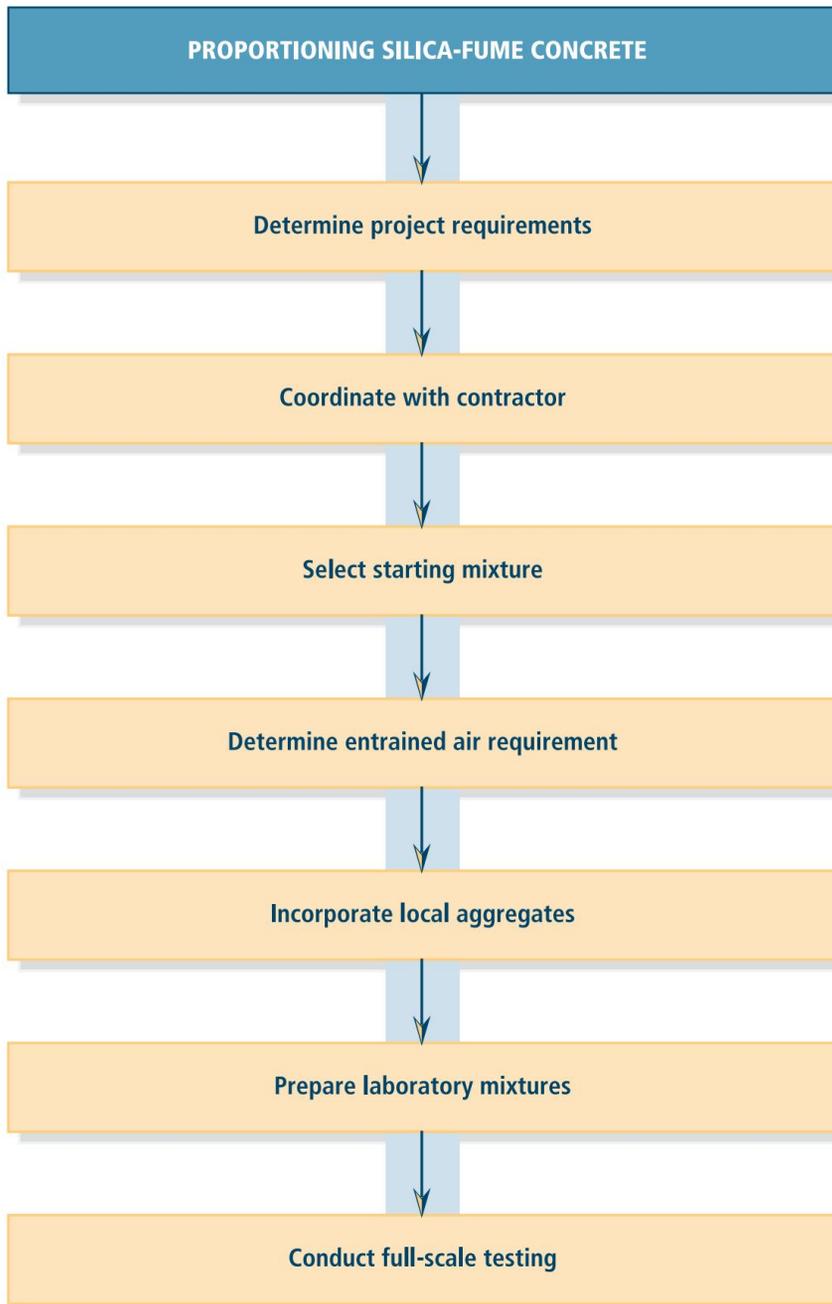


FIGURA 5.3. Etapas de dosagem de concreto de sílica ativa. Cada uma dessas etapas é discutida em detalhes no texto.

5.4 PROCEDIMENTO DE PROPORCIONAMENTO

TABELA 5.3

PROPORÇÕES INICIAIS DE MISTURA DE CONCRETO DE SÍLICA-FUMA RECOMENDADAS PARA VÁRIAS APLICAÇÕES					
	CONVÉS DE PONTE DE ALTA RESISTÊNCIA, CONCRETO Torre da Chave, Cleveland	CONCRETO Scotia Plaza, Estado de Toronto	COM CINZAS MOSCAS de Nova York Mistura DOTHP	MOLHADO SHOTCRETE REPARAR	TEMPERATURA CONTROLADA CONCRETO Hanford <small>Instalação de armazenamento</small>
	MISTURA 1	MISTURA 2	MISTURA 3	MISTURA 4	MISTURA 5
Referências	Nenhum	Bickley, et al, Alcom	palpe e 1991 Owens, 2000	Forrest, e outros, 1995	Holanda, 1998
Resistência à compressão (Nota 1)	83 MPa em 28 dias	69 MPa em 28 dias	> 37 MPa em 28 dias	42 MPa em 28 dias	35 MPa em 28 dias 42 MPa em 90 dias
Cloreto rápido — teste, coulombs		303 em 1 ano 258 em 2 anos	< 1.600	—	—
Outros requerimentos	Bombeável, 57 histórias	— Minimizar rachaduras de plástico e retração por secagem		59 kg/m ³ de fibras de aço para aumentar resistência inicial de	Max entregue < 21°C, Max em 48 h < 38°C, para Bombeável, tenacidade para remoção de forma
Ar aprisionado (Nota 2)	—	—	6,50 por cento	8 a 10 por cento 2 a 6 por cento conforme entregue 4 a 6 por cento no local	6 por cento conforme
Queda	> 250 mm	100 mm	Desconhecido	50 a 100 mm	Desconhecido
Tamanho máximo agregado	13 mm	39mm	39mm	9,5 mm	25 mm
Cimento, kg/m ³	406	316	297	405	232
Cinzas volantes, kg/m ³	0	0	80, Classe F	0	89, Classe F
Cimento de escória, kg/m ³	169	117	0	0	0
Sílica ativa kg/m ³	47	37	24	42	35
Máximo p/cm	0,24	0,31	0,40	0,45	0,37
Água, kg/m ³ (Nota 3)	149	145	160	200	99

Nota 1. A força mostrada é f_c. Adicione o overdesign apropriado para o desenvolvimento da mistura.

Nota 2. A redução permitida no conteúdo de ar para resistência acima de 35 MPa foi tomada.

Nota 3. Inclui água no HRWRA para misturas com w/cm muito baixo.

5.4 PROCEDIMENTO DE PROPORCIONAMENTO

TABELA 5.3 (continuação)

PROPORÇÕES INICIAIS DE MISTURA DE CONCRETO DE SÍLICA-FUMA RECOMENDADAS PARA VÁRIAS APLICAÇÕES					
	ALTO-DESEMPENHO ESTRUTURAL VIGAS DE PONTE Milwaukee Colorado DOT	ESTACIONAMENTO ALTA RESISTÊNCIA ALTA RESISTÊNCIA Aeroporto	TESTE MISTURAR	TESTE MISTURAR	PONTE ÁREA COBERTA Colorado DOT
	MISTURA 6	MISTURA 7	MISTURA 8	MISTURA 9	MISTURA 10
Referências	Leonardo, 1999	Dados de Membro da SFA	Burg & Ost, 1994	Burg & Ost, 1994	Xi, e outros, 2003
Compressiva 45 MPa na liberação 14 MPa em 36 horas 89 MPa em 28 dias 107 MPa em 28 dias de resistência (Nota 1) 69 MPa final 39 MPa em 56 dias 115 MPa em 3 anos 126 MPa em 3 anos					32 MPa em 28 dias
Cloreto rápido - < 1.000 de núcleos - teste, coulombs em 2-10 meses				—	1.400–1.600 em 56 dias
Outros requerimentos	—	—	—	—	—
Ar aprisionado (Nota 2)	Desconhecido	Desconhecido	—	—	8,5 por cento
Queda	Desconhecido	160 a 190mm	250 mm	240 mm	140mm
Tamanho máximo agregado	Desconhecido	Desconhecido	13 mm	13 mm	Desconhecido
Cimento, kg/m ³	433	335	475	475	288
Cinzas volantes, kg/m ³	0	59, Classe C	59, Classe C	104, Classe C	58, Classe F
Cimento de escória, kg/m ³	0	0	0	0	0
Sílica ativa kg/m ³	21	23	24	74	12
Máximo p/cm	0,28	0,35	0,29	0,23	0,41
Água, kg/m ³ (Nota 3)	127	146	160	151	147

Nota 1. A força mostrada é f_c. Adicione o overdesign apropriado para o desenvolvimento da mistura.

Nota 2. A redução permitida no conteúdo de ar para resistência acima de 35 MPa foi tomada.

Nota 3. Inclui água no HRWRA para misturas com w/cm muito baixo.

5.4 PROCEDIMENTO DE PROPORCIONAMENTO

TABELA 5.3 (continuação)

CONCRETO DE SÍLICA-FUMA DE PARTIDA RECOMENDADO		
PROPORÇÕES DE MISTURA PARA VÁRIAS APLICAÇÕES		
	COMÉRCIO MUNDIAL CENTRO 1 Cidade de Nova York	MAR LESTE PONTE China
	MISTURA 11	MISTURA 12
Referências	Dados de mistura SCC de Norchem (2012)	Dados de Elkem (2002)
Resistência à compressão (Nota 1)	83 MPa aos 28 dias	50 MPa aos 28 dias
Teste rápido de cloreto, coulombs	—	< 750
Outros requerimentos	—	—
Ar aprisionado (Nota 2)	—	—
Queda	610-710 mm (fluxo de queda)	250 mm
Tamanho máximo agregado	16 mm	Desconhecido
Cimento, kg/m ³	173	188
Cinzas volantes, kg/m ³	51, Classe F	28, Classe F
Cimento de escória, kg/m ³	279	239
Sílica ativa kg/m ³	30	15
Máximo p/cm	0,29	0,32
Água, kg/m ³ (Nota 3)	155	150

Nota 1. A força mostrada é f_c . Adicione o overdesign apropriado para o desenvolvimento da mistura.

Nota 2. A redução permitida no conteúdo de ar para resistência acima de 35 MPa foi tomada.

Nota 3. Inclui água no HRWRA para misturas com w/cm muito baixo.

5.4 PROCEDIMENTO DE PROPORCIONAMENTO

Em 2014, a SFA patrocinou um programa de pesquisa para a Federal Railroad Administration (FRA) para abordar a abrasão do assento de dormentes de concreto. A tecnologia já está bem desenvolvida usando alto teor de agregado graúdo com excelentes características de dureza combinadas com baixo w/cm para maximizar a resistência à abrasão. O aumento da porcentagem de sílica ativa, a alternância de materiais cimentícios suplementares e a diminuição de w/cm foram investigados para maximizar o desempenho da resistência à compressão. Outras propriedades analisadas foram aumentar a trabalhabilidade do concreto para melhorar as propriedades de consolidação, prolongar a vida útil e reduzir a pegada de carbono do concreto.

Projetos de mistura de concreto selecionados, FRA 2-6 na Tabela 5.4, foram avaliados para melhorar a resistência à abrasão além do concreto especificado padrão de última geração (FRA-1) para a fabricação de dormentes de trilho de concreto. O teor de agregado graúdo foi mantido constante e o aumento do volume do material cimentício foi compensado pela redução do teor de agregado miúdo e água. HRWR foi usado para maximizar a trabalhabilidade. Os dados apresentados também incluem previsões de vida útil feitas com o Life-365.

5.4 PROCEDIMENTO DE PROPORCIONAMENTO

TABELA 5.4

MISTURAS DE CONCRETO AVALIADAS DURANTE A SILICA FUME ASSOCIATION/ PROGRAMA DE TESTE DA ADMINISTRAÇÃO FERROVIÁRIA FEDERAL						
	FRA - 1	FRA - 2	FRA - 3	FRA - 4	FRA - 5	FRA - 6
Cimentício Total Conteúdo de Materiais (kg/m ³)	445	475	489	510	534	578
Cimento de escória, grau 100 -		—	— 34,9 por cento	40,0 por cento	46,2 por cento	
Cinza volante, Classe F	6,7 por cento	6,3 por cento	6,1 por cento	—	—	—
Silica Fumaça	— 6,3 por cento	9,1 por cento	11,6 por cento	12,2 por cento	12,3 por cento	
Água-Cimentícia Relação de materiais	0,35	0,30	0,28	0,26	0,24	0,22
Queda ou Fluxo de Queda (mm)	45	225	225	230	580 Fluxo de Queda	560 Fluxo de Queda
Força compressiva, MPa em 28 dias	80	108	113	121	124	128
Aumentar	controle 35 por cento 41 por cento 51 por cento 55 por cento 60 por cento					
Abrasão, ASTM C779, profundidade de desgaste, mm (Nota 1)	1,65	1.42	1.25	1.17	1.27	1.14
Redução	controle 14 por cento 24 por cento 29 por cento 23 por cento 31 por cento					
Abrasão, ASTM C1138, perda de volume, cm ³ (Nota 2)	1,65	1.42	1.25	1.17	1.27	1.14
Redução	controle 67 por cento 75 por cento 83 por cento 83 por cento 75 por cento					
Previsão de vida útil, anos antes da necessidade de reparos (Nota 3)	16	28	40	104	136	156
Pegada de carbono Estimativa de CO ₂ , kg/m ³ (Nota 4)	401	401	402	290	278	272
Custos de material, cúbico	controle de estimativa 128 por cento 136 por cento 150 por cento 164 por cento 179 por cento por metro					

Nota 1. ASTM C779, Método de teste padrão para resistência à abrasão de superfícies horizontais de concreto.

Nota 2. ASTM C1138, Método de Teste Padrão para Resistência à Abrasão de Concreto (Método Subaquático).

Nota 3. As estimativas de vida útil são para corrosão induzida por cloreto de aço de reforço. As estimativas foram derivadas usando o Life-365 assumindo uma exposição costeira com cobertura de concreto de 38 mm.

Nota 4. As estimativas de redução de CO₂ foram baseadas na quantidade de cimento Portland e materiais cimentícios suplementares nas misturas.

5.4 PROCEDIMENTO DE PROPORCIONAMENTO

PASSO 4

Determine o volume de ar contido necessário. É essencial que o concreto de sílica ativa que será exposto ao congelamento e descongelamento enquanto saturado seja aprisionado por ar. Use uma tabela padrão da indústria, como a encontrada em ASTM ou ACI, para determinar o volume de ar necessário. A Tabela 5.1 mostra uma dessas tabelas do ACI 318. Geralmente é permitido reduzir o teor de ar em um por cento para resistência à compressão acima de 35 MPa.

PASSO 5

Incorporar agregados locais na mistura inicial. Há duas considerações aqui:

- n Calcule um volume total de agregado que renderá um metro cúbico de concreto.* (Observação: alguns produtores de concreto dosam suas misturas de concreto para produzir um pouco mais de um metro cúbico. É melhor primeiro dosar o concreto para desenvolver o necessário fresco e endurecido propriedades e, em seguida, ajuste as proporções para o rendimento, conforme apropriado.)
- n Use uma proporção de agregado fino para grosso que funcione bem para materiais de projeto. esta proporção sempre pode ser ajustado ao fazer misturas de teste. Embora a proporção de agregado fino para grosso tenha influência na trabalhabilidade, pequenas mudanças não afetarão seriamente as propriedades do concreto endurecido. Devido à natureza muito fina da sílica ativa, pode ser apropriado começar com uma mistura de concreto levemente "lixada" em comparação com misturas semelhantes sem sílica ativa. Se uma proporção inicial apropriada de agregado fino para grosso não for conhecida, a orientação sobre a seleção das proporções de agregado inicial pode ser encontrada no ACI 211.1.
- n O controle da umidade agregada é crítico para testes de laboratório e em escala real. O controle da umidade do agregado é mais crítico para o concreto de sílica ativa do que para o concreto sem sílica ativa. Ao trabalhar com concretos com w/cm muito baixo, pequenas mudanças no teor de água podem resultar em mudanças significativas no desempenho.

*Exemplos de proporção são dados no texto em unidades do SI. Os mesmos exemplos são mostrados no Apêndice 1 usando unidades de polegada-libra.

5.4 PROCEDIMENTO DE PROPORCIONAMENTO

PASSO 6

Prepare misturas de teste de laboratório. Esta etapa não é tão diferente do que é feito normalmente. No entanto, a SFA está ciente de casos em que o concreto de sílica ativa preparado em laboratório não conseguiu produzir as propriedades esperadas do concreto endurecido, seja a propriedade de resistência à compressão ou baixa permeabilidade. Este problema é particularmente comum em laboratórios com misturadores de concreto pequenos e muitas vezes menos eficientes. A Figura 5.4 mostra as etapas a serem seguidas na fabricação de concreto de sílica ativa em laboratório. Seguir essas recomendações ajudará a garantir que os resultados no laboratório se assemelhem aos resultados esperados na produção real de concreto de sílica ativa.

- n A sílica ativa é um pó muito fino — as partículas têm aproximadamente 1/100 do diâmetro de grãos de cimento portland. Quando usado para produzir concreto de alto desempenho, a sílica ativa é tipicamente 4-15 por cento do peso do cimento. A taxa de adição exata depende das características específicas de desempenho a serem alcançadas. Em comparação com os outros ingredientes do concreto, a quantidade de sílica ativa utilizada é pequena. Para que a sílica ativa seja eficaz, ela deve ser dispersa uniformemente por todo o concreto.
- n Ao fazer concreto no laboratório, a chave para o sucesso é dosar a sílica ativa em no tempo adequado e, em seguida, misturando o concreto adequadamente. ASTM C192, *Prática padrão para fabricação e cura de amostras de teste de concreto no laboratório*, parágrafo 7.1.2 recomenda: “Misture o concreto, depois que todos os ingredientes estiverem no misturador, por 3 min. seguido de 3 min. descanso, seguido de uma mistura final de 2 minutos. Infelizmente, esses tempos de mistura recomendados simplesmente não são longos o suficiente para garantir que a sílica ativa seja bem dispersa.
- n A SFA recomenda enfaticamente que sílica ativa não densificada seja usada em misturadores de laboratório. Se sílica ativa densificada for usada, será necessário um tempo de mistura adicional.
- n No laboratório, dosar o concreto com o teor máximo de água permitido. Lembre-se de que, mesmo com o máximo de água permitido, pode não haver queda mensurável. Use aditivos químicos para obter a trabalhabilidade necessária.
- n Siga as recomendações do fornecedor de aditivos sobre quando e como adicionar todos os aditivos químicos. Não misture quaisquer aditivos antes de adicioná-los à mistura de concreto.

5.4 PROCEDIMIENTO DE PROPORCIONAMENTO

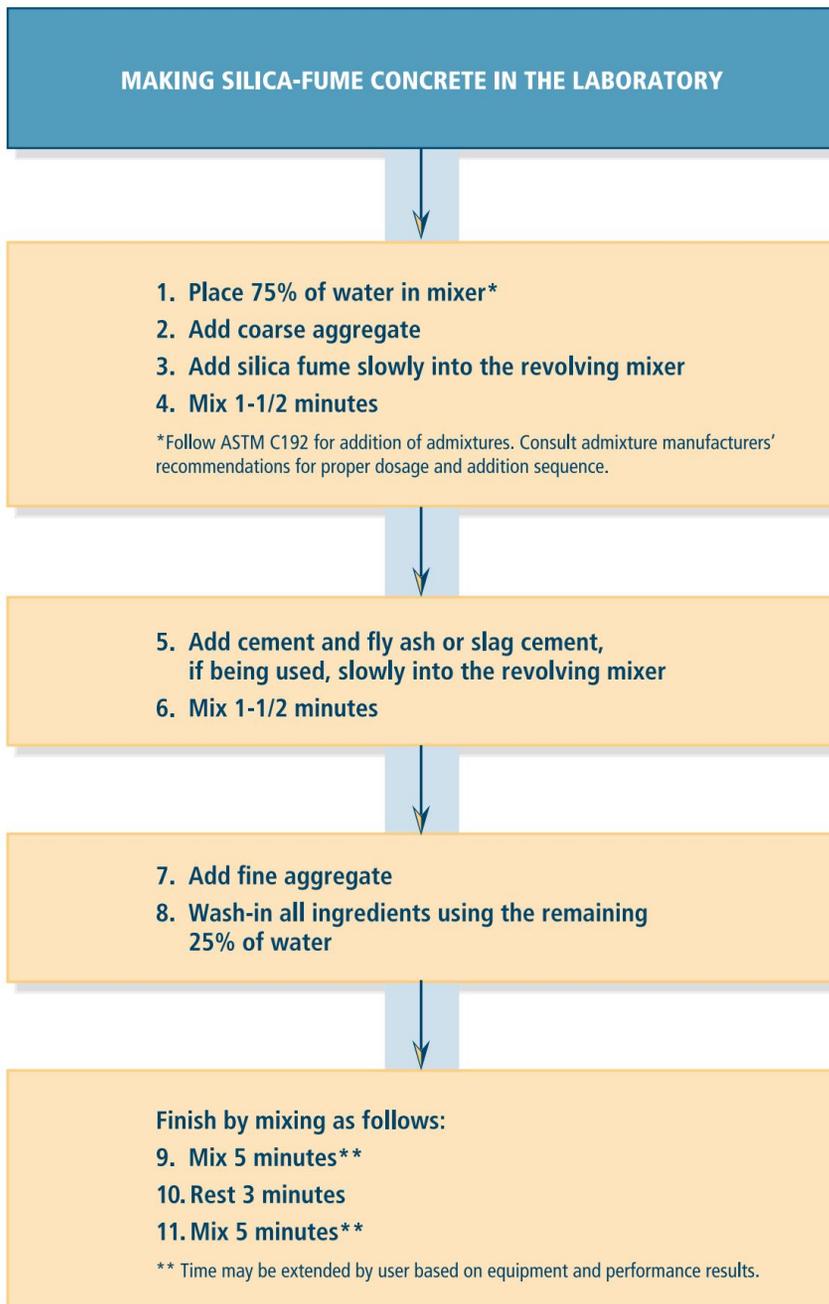


FIGURA 5.4. Recomendações para a fabricação de concreto de sílica ativa em misturador de laboratório.

5.4 PROCEDIMENTO DE PROPORCIONAMENTO

- n A sílica ativa deve sempre ser adicionada com o agregado graúdo e um pouco da água. O lote de sílica ativa sozinho ou primeiro pode resultar em compactação do cabeçote ou em bolas no misturador. Misture sílica ativa, agregados grossos e água por 11 y2 minutos.
- n Adicione o cimento portland e qualquer outro material cimentício, como cinzas volantes ou escória cimento. Misture por mais 11 y minutos.
- n Adicione o agregado miúdo e use a água restante para lavar em quaisquer misturas químicas adicionadas no final da sequência de dosagem. Misture por 5 minutos, descanse por 3 minutos e misture por 5 minutos. O tempo real de mistura pode variar, dependendo das características de um misturador específico. Se houver alguma dúvida de que a dispersão total e a mistura eficiente foram alcançadas, misture por mais tempo.
- n Revise as propriedades do concreto fresco e faça os ajustes necessários para obter a trabalhabilidade desejada, teor de ar e outras propriedades. Uma vez que as propriedades frescas são estabelecidas, faça amostras para testes de concreto endurecido.
- n Com base nos resultados do teste do concreto endurecido, ajuste as proporções da mistura conforme necessário. Neste ponto, pode ser necessário fazer misturas laboratoriais adicionais ou pode ser hora de ir para testes em escala de produção.

5.4 PROCEDIMENTO DE PROPORCIONAMENTO

PASSO 7

Realizar testes em escala de produção. Sempre pode haver pequenas diferenças entre as proporções desenvolvidas em laboratório e as utilizadas na produção de concreto, principalmente nas dosagens de aditivos químicos. Fazer lotes de produção do concreto é a melhor maneira de resolver os problemas. Tenha em mente:

- n A experiência da SFA é que as betoneiras, e especialmente as betoneiras centrais, são muito mais eficiente em quebrar as aglomerações e dispersar a sílica ativa. No entanto, lembre-se de limitar os tamanhos dos lotes à capacidade nominal de mistura do equipamento.
- n A realização de testes em grande escala não é um momento para economizar fazendo lotes muito pequenos. Faça concreto suficiente para ser representativo do que será feito durante o projeto. Lembre-se que é preciso muita pasta para revestir o interior de um tambor de caminhão ou de uma central misturadora. Se for usado um lote muito pequeno de concreto, uma quantidade significativa de pasta pode ser perdida para o tambor. Ao realizar testes de produção, faça pelo menos 3 m³ para a maioria dos caminhões ou misturadores centrais.
- n Teste para determinar se o concreto atende aos requisitos de fresco e endurecido para o projeto. Como a mistura já foi ajustada no laboratório, grandes ajustes neste ponto não devem ser necessários. Se parecer que o desempenho não é o mesmo visto no laboratório, examine o processo cuidadosamente — não há razão para esperar grandes diferenças.
- n Faça mais de um lote. É sempre bom confirmar o desempenho de um determinado mistura de concreto.

5.5 AJUSTE DA MISTURA

Existem duas áreas que freqüentemente requerem ajustes durante o laboratório ou o teste em escala de produção. Estes são a resistência à compressão e a viscosidade do fresco concreto.

Força compressiva. A falha em atingir uma resistência à compressão necessária é mais frequentemente o resultado de ter muita água no concreto. Para concreto de alta resistência, não tenha medo de deixar cair o w/cm bem abaixo dos níveis habituais. Observe novamente as misturas iniciais na Tabela 5.3. Para entrar na faixa de resistência muito alta, deve haver um teor de água muito baixo.

Viscosidade do concreto. Em algumas aplicações, como trabalhos planos com maiores quantidades de sílica ativa, os finalizadores podem reclamar que o concreto está pegajoso. Essa viscosidade é, na verdade, uma coesão aumentada, que é resultado do alto teor de finos e do alto teor de superplastificante. Se a aderência for um problema, aqui estão algumas sugestões:

- n A sílica ativa de uma fonte específica pode se comportar de maneira diferente quando usada com diferentes superplastificantes. Simplesmente experimente um superplastificante diferente do seu fornecedor de aditivos e veja se essa mudança faz diferença na aderência.
- n O uso de um dos aditivos redutores de água intermediários também pode ajudar a reduzir a viscosidade. Muitos desses produtos geralmente são baseados em um ingrediente de lignina, que parece ajudar a reduzir a viscosidade. Tente substituir cerca de um terço do superplastificante pelo produto intermediário. Uma vez que esses produtos intermediários têm o mesmo preço dos superplastificantes, deve haver pouco impacto no custo do concreto.
- n Observe a classificação do agregado miúdo. Se houver muitos finos no agregado, substituir parte ou todo o agregado miúdo por um material mais grosso pode ajudar a reduzir a viscosidade.

5.6 EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO DE MISTURAS

A seguir estão três exemplos do procedimento de dosagem de mistura passo a passo. Os mesmos exemplos são dados em unidades de polegada-libra no Apêndice 1 deste manual.

5.6.1 EXEMPLO 1. Convés da Ponte, Figura 5.5.



FIGURA 5.5. Projeto de deck de ponte. As proporções de mistura para um concreto que poderia ser usado neste projeto são desenvolvidas no Exemplo 1.

PASSO 1

Determinar os requisitos do projeto. Uma revisão das especificações desenvolve os seguintes requisitos:

n Baixa permeabilidade ao cloreto, aproximadamente 1.500 Coulombs em 56 dias

n Resistência à compressão de 31 MPa em 28 dias

n Calor e retração reduzidos n

Taxa reduzida de ganho de resistência para minimizar

rachaduras n Proteção contra congelamento e descongelamento em um ambiente severo

5.6 EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO DE MISTURAS

PASSO 2

Coordenar com o empreiteiro. As discussões com o empreiteiro desenvolvem os seguintes requisitos adicionais:

n O tamanho máximo do agregado graúdo é de 25 mm n O

abatimento desejado é de 100 a 150 mm n

O concreto será colocado principalmente por bomba

ETAPA 3

Selecione a mistura inicial. Na Tabela 5.3, selecione a mistura Colorado DOT como sendo uma boa mistura inicial. Esta mistura tem as seguintes características:

Cimento	288 kg/m ³
Cinzas volantes	58 kg/m ³
sílica ativa	12 kg/m ³
Máximo w/cm	0,41

PASSO 4

Determine o volume de ar necessário. Da Tabela 5.1 para agregado de 25 mm, o volume de ar necessário para um ambiente severo é de 6 por cento. Como esse concreto não terá uma resistência à compressão superior a 35 MPa, não reduza o teor de ar em 1%.

PASSO 5

Incorporar agregados locais.

Primeiramente, determine o volume que a pasta irá ocupar, conforme tabela a seguir:

MATERIAL	MASSA, kg	VOLUME DE GRAVIDADE	ESPECÍFICO, m ³
Cimento	288	3.15	0,091
Cinzas volantes	58	2,50	0,023
sílica ativa	12	2.20	0,005
Água (p/cm = 0,41)	147	1,00	0,147
Ar, 6 por cento	—	—	0,060

Volume total da pasta = 0,326 m³

5.6 EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO DE MISTURAS

Em segundo lugar, calcule volumes e massas agregados:

Peso específico do agregado grosso: 2,68
Peso específico do agregado miúdo: 2,64
Agregado fino: 40 por cento do volume total do agregado (Observação: Se uma proporção inicial apropriada de agregado fino para grosso não for conhecida, orientações sobre como selecionar as proporções iniciais do agregado podem ser encontradas no ACI 211.1.)
Volume de agregado = $1,000 \text{ m}^3 - 0,326 \text{ m}^3 = 0,674 \text{ m}^3$
Volume de agregado miúdo = $0,40 \times 0,674 \text{ m}^3 = 0,270 \text{ m}^3$
Massa de agregado miúdo = $0,270 \text{ m}^3 \times 2,64 \text{ Mg/m}^3 = 0,713 \text{ Mg} = 713 \text{ kg}$
Volume de agregado grosso = $0,674 \text{ m}^3 - 0,270 \text{ m}^3 = 0,404 \text{ m}^3$
Massa do agregado grosso = $0,404 \text{ m}^3 \times 2,68 \text{ Mg/m}^3 = 1,083 \text{ Mg} = 1.083 \text{ kg}$

PASSO 6

Prepare misturas de teste de laboratório. Não se esqueça do seguinte:

n Controle a dispersão de sílica ativa, consulte a Figura 5.4 para obter recomendações
 n Controle cuidadosamente e leve em conta a umidade nos agregados
 n Misture bem
 n Realize os testes necessários em concreto fresco e endurecido
 n Ajuste a mistura conforme necessário para obter as propriedades exigidas

PASSO 7

Realizar testes em escala de produção. Uma vez satisfeito com os resultados do programa de testes de laboratório, conduza testes em escala de produção. Considere estes pontos:

n Use lotes grandes o suficiente para serem representativos
 n Teste mais de uma vez
 n Trabalhar com o empreiteiro para realizar testes de colocação e acabamento conforme necessário

5.6 EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO DE MISTURAS

5.6.2 EXEMPLO 2. Estrutura de estacionamento moldada no local, Figura 5.6.



FIGURA 5.6. Projeto de estrutura de estacionamento. As proporções de mistura para um concreto que poderia ser usado neste projeto são desenvolvidas no Exemplo 2.

PASSO 1

Determinar os requisitos do projeto. Uma revisão das especificações desenvolve os seguintes requisitos:

- n Baixa permeabilidade ao cloreto, inferior a 1.500 Coulombs aos 42 dias n
- Resistência inicial de 28 MPa para permitir a tensão dos tendões n
- Resistência à compressão de 42 MPa aos 28 dias n
- Calor e encolhimento reduzidos n
- Proteção contra congelamento e descongelamento em um ambiente severo

PASSO 2

Coordenar com o empreiteiro. As discussões com o empreiteiro desenvolvem os seguintes requisitos adicionais:

- n O tamanho máximo do agregado graúdo é de 25 mm n
- O abatimento desejado é de 125 a 175 mm n
- O concreto será colocado principalmente por bomba

5.6 EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO DE MISTURAS

ETAPA 3

Selecione a mistura inicial. Na Tabela 5.3, selecione a mistura da estrutura de estacionamento do aeroporto de Milwaukee como sendo uma boa mistura inicial. Esta mistura tem as seguintes características:

Cimento	335 kg/m ³
Cinzas volantes (Classe C)	60 kg/m ³
sílica ativa	24 kg/m ³
Máximo w/cm	0,35

PASSO 4

Determine o volume de ar necessário. Da Tabela 5.1 para agregado de 25 mm, o volume de ar necessário para um ambiente severo é de 6 por cento. Como esse concreto terá uma resistência à compressão de mais de 35 MPa, reduza o teor de ar em 1% e proporcione 5%.

PASSO 5

Incorporar agregados locais.

Primeiramente, determine o volume que a pasta irá ocupar, conforme tabela a seguir:

MATERIAL	MASSA, kg	VOLUME DE GRAVIDADE ESPECÍFICO, m ³	
Cimento	335	3,15	0,106
Cinzas volantes	60	2,50	0,024
sílica ativa	24	2,20	0,011
Água (p/cm = 0,35)	142	1,00	0,142
Ar, 5 por cento	—	—	0,050

Volume total da pasta = 0,338 m³

5.6 EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO DE MISTURAS

Em segundo lugar, calcule volumes e massas agregados:

Peso específico do agregado grosso: 2,72 Peso
específico do agregado miúdo: 2,68 Agregado
fino: 40 por cento do volume total do agregado (<i>Observação: Se uma proporção inicial apropriada de agregado fino para grosso não for conhecida, orientações sobre como selecionar as proporções iniciais do agregado podem ser encontradas no ACI 211.1 .)</i>
Volume de agregado = 1,000 m ³ – 0,338 m ³ = 0,662 m ³ Volume de
agregado miúdo = 0,40 × 0,662 m ³ = 0,265 m ³ Massa de agregado
miúdo = 0,265 m ³ × 2,68 Mg/m ³ = 0,710 Mg = 710 kg Volume de agregado grosso =
0,662 m ³ – 0,265 m ³ = 0,397 m ³ Massa do agregado grosso = 0,397 m ³ ×
2,72 Mg/m ³ = 1,080 Mg = 1.080 kg

PASSO 6

Prepare misturas de teste de laboratório. Não se esqueça do seguinte:

n Controle a dispersão de sílica ativa, consulte a Figura 5.4 para obter recomendações n Controle cuidadosamente e leve em conta a umidade nos agregados n Misture bem n Realize os testes necessários em concreto fresco e endurecido n Ajuste a mistura conforme necessário para obter as propriedades exigidas

PASSO 7

Realizar testes em escala de produção. Uma vez satisfeito com os resultados do programa de testes de laboratório, conduza testes em escala de produção. Considere estes pontos:

n Use lotes grandes o suficiente para serem representativos n Teste mais de uma vez
n Trabalhar com o empreiteiro para realizar testes de colocação e acabamento conforme necessário

5.6 EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO DE MISTURAS

5.6.3 EXEMPLO 3. Pilares de Concreto de Alta Resistência, Figura 5.7.



FIGURA 5.7. Projeto de colunas de alta resistência. As proporções de mistura para um concreto que poderia ser usado neste projeto são desenvolvidas no Exemplo 3.

PASSO 1

Determinar os requisitos do projeto. Uma revisão das especificações desenvolve os seguintes requisitos:

n Resistência à compressão projetada de 96 MPa em 28 dias n

Sem exposição ao congelamento e descongelamento

5.6 EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO DE MISTURAS

PASSO 2

Coordenar com o empreiteiro. As discussões com o empreiteiro desenvolvem os seguintes requisitos adicionais:

n O tamanho máximo do agregado graúdo é de 13 mm n O

abatimento desejado é de 200 a 250 mm n

O concreto será colocado principalmente por bomba

ETAPA 3

Selecione a mistura inicial. Na Tabela 5.3, selecione a mistura de alta resistência (Mistura 9) como sendo uma boa mistura inicial. Esta mistura tem as seguintes características:

Cimento	475 kg/m ³
Cinzas volantes	105 kg/m ³
sílica ativa	75 kg/m ³
Máximo w/cm	0,23

PASSO 4

Determine o volume de ar necessário. Nenhum. Suponha que 1,5 por cento ficará preso nessa mistura.

PASSO 5

Incorporar agregados locais.

Primeiramente, determine o volume que a pasta irá ocupar, conforme tabela a seguir:

MATERIAL	MASSA, kg	VOLUME DE GRAVIDADE ESPECÍFICO, m ³	
Cimento	475	3,15	0,151
Cinzas volantes	105	2,50	0,042
sílica ativa	75	2,20	0,034
Água (p/cm = 0,35)	151	1,00	0,151
Ar, 1,5 por cento	—	—	0,015

Volume total da pasta = 0,393 m³

5.6 EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO DE MISTURAS

Em segundo lugar, calcule volumes e massas agregados:

Peso específico do agregado grosso: 2,68
Peso específico do agregado miúdo: 2,60
<p>miúdo: 38 por cento do volume total do agregado (<i>Nota: Se uma proporção inicial apropriada de agregado miúdo para grosso não for conhecida, orientações sobre como selecionar as proporções iniciais do agregado podem ser encontradas no ACI 211.1.</i>)</p>
<p>Volume de agregado = $1,000 \text{ m}^3 - 0,393 \text{ m}^3 = 0,607 \text{ m}^3$</p>
<p>Volume de agregado miúdo = $0,38 \times 0,607 \text{ m}^3 = 0,231 \text{ m}^3$</p>
<p>Massa de agregado miúdo = $0,231 \text{ m}^3 \times 2,60 \text{ Mg/m}^3 = 0,601 \text{ Mg} = 601 \text{ kg}$</p>
<p>Volume de agregado grosso = $0,607 \text{ m}^3 - 0,231 \text{ m}^3 = 0,376 \text{ m}^3$</p>
<p>Massa do agregado grosso = $0,376 \text{ m}^3 \times 2,68 \text{ Mg/m}^3 = 1,088 \text{ Mg} = 1.088 \text{ kg}$</p>

PASSO 6

Prepare misturas de teste de laboratório. Não se esqueça do seguinte:

n Controle a dispersão de sílica ativa, consulte a Figura 5.4 para obter recomendações
 n Controle cuidadosamente e leve em conta a umidade nos agregados
 n Misture bem
 n Realize os testes necessários em concreto fresco e endurecido
 n Ajuste a mistura conforme necessário para obter as propriedades exigidas

PASSO 7

Realizar testes em escala de produção. Uma vez satisfeito com os resultados do programa de testes de laboratório, conduza testes em escala de produção. Considere estes pontos:

n Use lotes grandes o suficiente para serem representativos
 n Teste mais de uma vez
 n Trabalhar com o empreiteiro para realizar testes de colocação e acabamento conforme necessário

5.7 CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS PARA PROPORCIONAMENTO DA MISTURA

Os exemplos de dosagem de mistura dados neste capítulo são, obviamente, baseados em procedimentos padrão. Novos sistemas interessantes estão sendo desenvolvidos para aumentar essas práticas padrão. Dois desses procedimentos avançados são discutidos nas seções a seguir. A SFA recomenda que os usuários de qualquer uma dessas abordagens tenham um forte entendimento da dosagem de mistura de concreto para garantir que as misturas sejam adequadas para produção e uso.

5.7.1 Embalagem de Partículas

O empacotamento de partículas é um termo abrangente para vários procedimentos que podem melhorar o desenvolvimento da mistura. Como o nome sugere, esses procedimentos pegam as características físicas dos materiais, graduações e pesos específicos, e os pesos do projeto da mistura e calculam como as partículas se compactam em um espaço de metro cúbico. Quanto mais compacto o empacotamento – melhor classificação de tamanho de partícula grande para pequeno – mais denso será o concreto. Isso pode dar uma mistura de concreto mais durável e mais forte, simplesmente obtendo a “mistura” correta dos componentes.

Ajustes do projeto para alcançar o melhor empacotamento de partículas podem resultar em projetos com menores teores de materiais cimentícios e, muitas vezes, maiores proporções de agregados grossos para finos. O empacotamento de partículas pode ser vantajoso para alcançar o melhor equilíbrio de materiais finos para misturas de concreto altamente fluidas e é usado regularmente para dosar concretos SCC e UHPC.

Vários programas foram desenvolvidos para conduzir a análise de empacotamento de partículas. Este software pode calcular as alterações no conteúdo do material para obter o empacotamento ideal das partículas, quando apresentado com o projeto de mistura “original”. Esse software usará apenas os materiais fornecidos no projeto e não sugerirá o uso de materiais alternativos. Este software não exclui a necessidade de conhecimento dos procedimentos padrão de projeto de mistura, o que é essencial para entender os requisitos de desempenho da mistura, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Dois exemplos desse tipo de software são:

- n EMMA – Elkem Materials Mixture Analyser. Pode ser solicitado (download gratuito) no site: <https://www.elkem.com/silicon-products/construction/concrete/>
- n KU MIX– University of Kansas– Otimização de Agregados de Proporção de Concreto. Esse software pode ser acessado via: <https://www.silicafume.org/ku-mix.html>

5.7.2 Modificando a Viscosidade

Além das abordagens de software descritas acima, o ACI 211.6T, *Aggregate Suspension Mixture Proportioning Method*, fornece uma abordagem manual para o desenvolvimento de misturas de concreto com empacotamento de partículas otimizado.

5.7 CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS PARA PROPORCIONAMENTO DA MISTURA

5.7.3 Abordagem Estatística para Misturas Complexas

Para projetos com requisitos complexos e onde o cimento portland e a sílica ativa podem ser usados em conjunto com cinzas volantes ou cimento de escória, o desenvolvimento das proporções da mistura no laboratório pode implicar a realização de um número muito grande de misturas experimentais. Mesmo com um grande número de bateladas, a mistura ótima, em termos de melhor desempenho ao menor custo, pode não ser encontrada.

Nesse caso, pode ser melhor usar uma abordagem estatística para o desenvolvimento da mistura. Em essência, esta abordagem consiste em seis etapas:

1. Determine o intervalo de variáveis a serem testadas. Por exemplo, um conjunto de variáveis pode incluir uma faixa de w/cm , uma faixa de teores de cimento Portland, uma faixa de substituição de cimento Portland por cinzas volantes e uma faixa de teores de sílica ativa.
2. Desenvolver um conjunto adequado de misturas a serem preparadas para avaliar os vários intervalos definidos acima.
3. Faça as misturas de concreto no laboratório e determine o fresco e o endurecido propriedades concretas de interesse.
4. Revise os dados do teste para determinar a mistura de concreto que melhor atenderá aos requisitos do projeto com o menor custo. Esta pode ser considerada a mistura de concreto ótima.
5. Confirme o desempenho da mistura ideal no laboratório. Com toda a probabilidade, você não terá feito esta mistura exata durante a fase de teste.
6. Passe para o teste em escala de produção.

A maioria dos produtores de concreto não tem acesso a um estatístico para ajudar no processo descrito acima. Este tipo de serviço pode ser prestado pelo fornecedor de aditivos químicos.

Informações adicionais podem ser encontradas em uma das seguintes referências: Luciano et al. (1991) ou Luciano e Bobrowski (1990).

Outra opção para otimizar uma mistura de concreto é usar um software online disponível no National Institute of Standards and Technology (NIST). Este programa é chamado de "COST" (Concrete Optimization Software Tool), e foi desenvolvido pela Federal Highway Administration. O NIST descreve os dois usos prováveis para esta ferramenta como:

n O primeiro uso (e provavelmente o mais comum) seria a dosagem de uma mistura de concreto para atender a um conjunto de critérios de desempenho, minimizando o custo da mistura. n O segundo uso seria maximizar ou minimizar uma ou mais propriedades do concreto (por exemplo, atingir a maior resistência possível ou a menor permeabilidade).

COST pode ser encontrado no seguinte local: <https://www.nist.gov/services-resources/software/concrete-optimization-software-tool>.

6 PRODUÇÃO DE SÍLICA-FUMAÇA

CONCRETO: MANUSEIO, CONJUNTO E MISTURA

Produzir concreto contendo sílica ativa não é significativamente diferente de produzir concreto sem sílica ativa.

Como a sílica ativa é fornecida – a granel ou em sacos – será um fator importante para determinar exatamente como o concreto é produzido.

Este capítulo aborda a fabricação de concreto contendo sílica ativa. Os tópicos abordados são armazenamento do material, dosagem em concreto durante a produção e mistura de concreto. Além disso, são apresentadas precauções para os problemas que podem surgir durante a produção de concreto.

6.1 Considerações Gerais.....	97
6.2 Sílica Fumegante Densificada em Massa	101
6.2.1 Remessa	101
6.2.2 Requisitos de armazenamento.....	...
6.2.3 Descarga.....	106
6.2.4 Lote	108
6.2.5 Misturando.....	109
6.2.6 Outras Preocupações.....	111
6.3 Sílica Fumosa Densificada em Sacos	112
6.3.1 Remessa	113
6.3.2 Requisitos de armazenamento.	114
6.3.3 Descarga.....	114
6.3.4 Loteamento	114
6.3.5 Misturando.....	116
6.3.6 Outras Preocupações.....	117

6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O objetivo durante a produção de concreto de sílica ativa é introduzir o mínimo possível de diferenças no processo de produção de concreto, ao mesmo tempo em que produz um concreto de alta qualidade e alto desempenho. O elemento-chave a ter em mente é que o concreto de sílica ativa inclui uma quantidade relativamente pequena de sílica ativa, normalmente 30-45 kg/m³, em uma quantidade relativamente grande de concreto, 2.400 kg/m³ para concreto de peso normal. Para que a sílica ativa seja eficaz, ela deve ser dosada com precisão e completamente dispersa.

Este capítulo apresenta primeiro recomendações gerais que se aplicam à produção de concreto de sílica ativa. O restante do capítulo é organizado pelo tipo de produto de sílica ativa que está sendo usado — densificado a granel ou densificado ensacado. Os tipos de produtos disponíveis são discutidos no Capítulo 2. A Figura 6.1 mostra qual seção do capítulo abrange cada forma de produto.

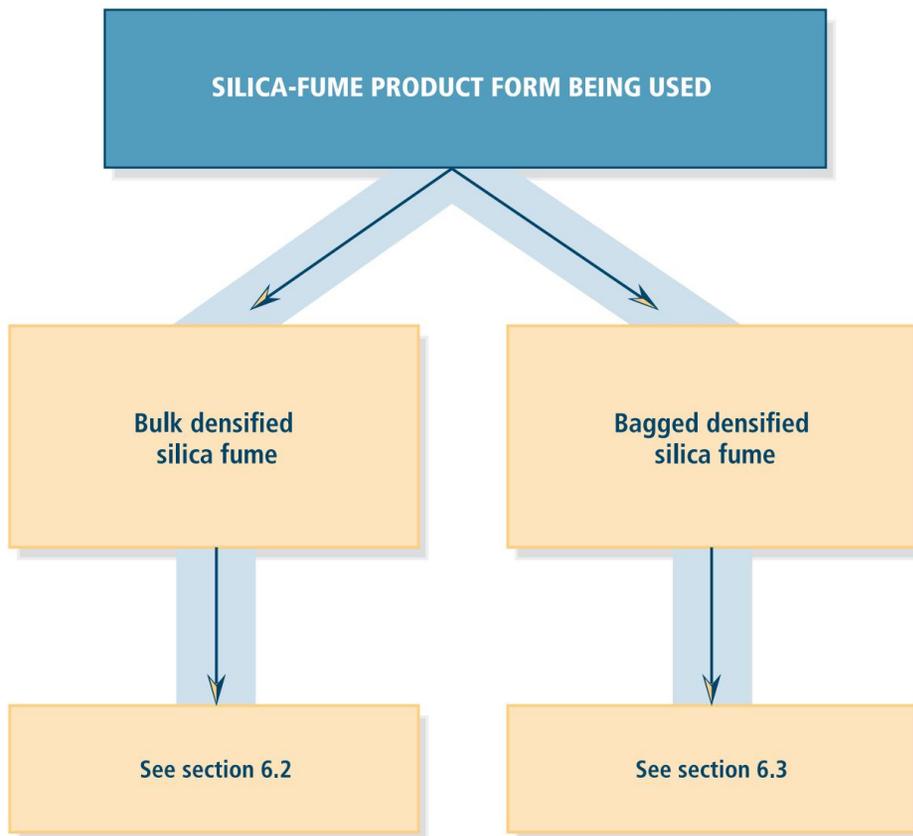


FIGURA 6.1. Organização do Capítulo 6. Selecione a seção do capítulo que discute a fabricação de concreto com a forma de produto de sílica ativa que foi selecionada.

6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Conforme apropriado, os seguintes tópicos são abordados para cada produto:

n Remessa n

Requisitos de armazenamento

n Descarga n

Loteamento

n Mistura n

Outras preocupações

A recomendação mais básica é ser excessivamente cauteloso no início de um projeto, caso você não tenha trabalhado com concreto de sílica ativa anteriormente. Seu fornecedor de mistura ou o SFA podem fornecer orientação sobre como começar a usar sílica ativa. Com o tempo, à medida que se ganha experiência, pode ser apropriado relaxar os procedimentos, desde que a qualidade do concreto seja mantida. É muito mais fácil relaxar ao longo do tempo do que tentar apertar os procedimentos se surgirem problemas.

A seguir estão várias recomendações gerais que se aplicam a todas as formas de produtos de sílica ativa:

n Entrada de ar. Geralmente será necessário aumentar a dosagem de aditivo incorporador de ar (AEA) para desenvolver e manter o teor de ar especificado para o concreto. A quantidade necessária de AEA geralmente será de 150 a 200 por cento da dosagem sem sílica ativa. Uma vez desenvolvido o volume de ar necessário, não há evidências que indiquem que o concreto de sílica ativa se comporte de maneira diferente do concreto sem sílica ativa no que diz respeito à manutenção do ar.

n Uniformidade do misturador. Frequentemente, há recomendações de que o teste de uniformidade do misturador, conforme descrito em ASTM C94, *Especificação padrão para concreto pronto*, seja realizado para qualificar caminhões betoneiras para projetos de concreto de sílica ativa. Esse teste não é necessário, a menos que haja uma preocupação específica sobre a uniformidade do concreto de sílica ativa de caminhão para caminhão. Este teste envolve a comparação de concreto de diferentes partes de uma carga usando conteúdo de ar, abatimento, peso unitário, proporções agregadas e resistência à compressão. Embora esses sejam parâmetros importantes para o concreto, eles podem não indicar se a sílica ativa está sendo bem dispersa. Se as especificações do projeto forem construídas com base no desempenho de um teste específico, como o teste rápido de cloreto, esse teste deve ser adicionado a qualquer teste de uniformidade realizado. Observe os resultados de todos os testes realizados para determinar se há mistura adequada em toda a carga.

6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

- n Temperatura do concreto.** Em concretos com alto teor de cimento portland e baixo teor de água, pode ocorrer aumento de temperatura causado pela hidratação do cimento portland. Dependendo da aplicação, este aumento de temperatura pode ter que ser considerado. O primeiro passo para controlar a temperatura é substituir parte do cimento portland por cinzas volantes ou cimento de escória adequado. A sílica ativa pode ser usada para compensar a perda de resistência precoce que pode resultar da substituição. Se um projeto tiver controles rigorosos de temperatura do concreto, medidas para controlar a temperatura do concreto conforme descrito no ACI 305R, *Guia para Concretagem em Clima Quente*, devem ser consideradas.
- n Loteamento.** Nunca coloque sílica ativa em qualquer forma em um misturador vazio antes de qualquer outro ingrediente. O contato entre a sílica ativa e qualquer água de lavagem ou argamassa no tambor pode resultar no desenvolvimento de bolas de sílica ativa que não se dissiparão durante a mistura. Recomendações específicas de lotes para sílica ativa a granel e ensacada são dadas mais adiante neste capítulo.
- n Mistura.** Concreto de alto desempenho contendo sílica ativa geralmente requer mistura adicional além do que normalmente é feito no concreto do dia-a-dia. Não tome atalhos com a mixagem - este é um lugar muito ruim para tentar economizar.
- n Remixagem.** Sempre remisture o concreto na chegada ao local do projeto. Normalmente, trinta revoluções na velocidade de mistura serão suficientes.
- n Procedimentos de lavagem do misturador.** Misturas de concreto com alto teor de materiais cimentícios, incluindo concreto de sílica ativa, podem ser mais difíceis de remover de um misturador. Se uma mistura de concreto for difícil de lavar de um tambor, as recomendações sobre lavagem da National Ready Mixed Concrete Association são fornecidas na Figura 6.2.

6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

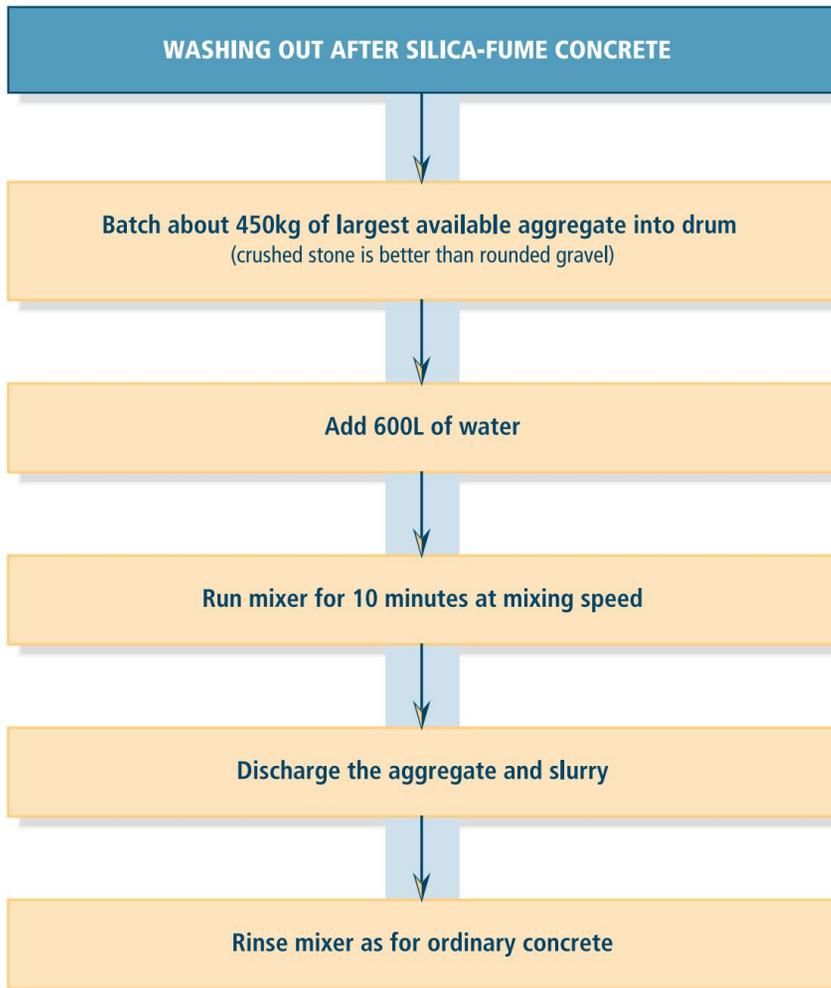


FIGURA 6.2. Recomendações para a lavagem de betoneiras após concreto de sílica ativa com base no *Manual do motorista de betoneira* NRMCA (2015).

6.2 FUMA DE SÍLICA DENSIFICADA A GRANEL

A sílica ativa densificada a granel é adequada para grandes projetos onde o espaço de armazenamento do silo está disponível. Este produto oferece as mesmas características de desempenho em concreto que a sílica ativa não densificada, sendo muito mais econômico e fácil de trabalhar. Lembre-se de que este material terá uma densidade aparente entre 450 e 700 kg/m³, enquanto o cimento portland entregue será de cerca de 1.500 kg/m³.

Essa diferença exigirá alguns ajustes no armazenamento e manuseio do material.

6.2.1 Envio

A sílica ativa densificada a granel é normalmente transportada nos mesmos tipos de navios-tanque usados para transportar cimento ou outras pozolanas. A Figura 6.3 mostra um descarregamento típico de um caminhão-tanque em uma usina de concreto. Estes petroleiros terão as seguintes características:

n Volume: 40 m³ n

Capacidade de material: Aproximadamente 20 toneladas

Esses caminhões-tanque terão almofadas de aeração para ajudar a mover o material durante o descarregamento.

Os principais fornecedores de sílica ativa nos Estados Unidos usam empresas de transporte que entregam apenas sílica ativa em seus tanques e que são muito experientes no manuseio do material. O uso de operadores de petroleiros sem treinamento ou experiência específica no fornecimento de sílica ativa não é recomendado.

6.2 FUMA DE SÍLICA DENSIFICADA A GRANEL



FIGURA 6.3. Descarga de fumaça de sílica densificada a granel em um silo. Observe a mangueira de borracha e a curva de grande raio no topo do silo.

6.2 FUMA DE SÍLICA DENSIFICADA A GRANEL

6.2.2 Requisitos de armazenamento

A sílica ativa densificada a granel pode ser armazenada em qualquer silo projetado para armazenar materiais cimentícios. Para grandes projetos em que serão usadas cargas múltiplas de sílica ativa, a capacidade mínima do silo deve ser de 80 m³ para permitir que o material adequado esteja disponível entre as entregas e para permitir a descarga completa dos caminhões-tanque.

Outras considerações para silos para armazenar sílica ativa incluem:

n Os silos devem estar livres de vazamentos e em boas condições gerais. **n** Silos com compartimentos compartilhados e uma única parede divisória devem ser inspecionados para garantir que nenhum material vazze de um compartimento para o outro. (Silos de parede simples não são permitidos pela maioria das especificações de concreto.) **n** Os silos para sílica ativa devem ser claramente marcados no local do tubo de enchimento. **n** Os silos devem ser ventilados com um sistema de coleta de pó funcional dimensionado para a capacidade do silo. Recomenda-se um sistema de recolha de pó com uma superfície mínima de 14 m². O sistema de coleta de poeira deve estar limpo no momento da entrega para eliminar a contrapressão durante o descarregamento.

A diferença mais significativa entre silos usados para armazenar cimento e aqueles usados para armazenar sílica ativa é o próprio tubo de enchimento. É altamente recomendável que qualquer silo usado para sílica ativa seja equipado com uma mangueira de enchimento de borracha em vez de um tubo de aço. As Figuras 6.4A, 6.4B e 6.4C resumem as recomendações para um silo de sílica ativa. As características de tal sistema são:

n Use uma mangueira de borracha de parede lisa com diâmetro mínimo de 150 mm.

n Conecte a mangueira ao silo aproximadamente a cada 3 a 4,5 m. Os anexos devem ser tais que a mangueira está livre para vibrar, o que ajudará a evitar bloqueios.

n Elimine tubos de aço no sistema sempre que possível. **n** Elimine curvas de 90 graus. Todas as curvas da mangueira devem ter um raio de pelo menos 1,5 m. **n** Minimizar ou eliminar, se possível, as passagens horizontais da mangueira. **n** Orientar a entrada no silo verticalmente no centro do silo. Não utilize nenhum tipo de caixa ou placa defletora. A Figura 6.4B mostra duas opções para conectar a mangueira de enchimento de borracha ao topo de um silo. Ambas as opções foram usadas com sucesso. Passar a mangueira de borracha diretamente no silo (Opção B) pode causar dificuldades na conexão.

Outra recomendação para o silo de sílica ativa é fornecer uma conexão de aterramento entre o silo e o tanque para evitar o acúmulo de cargas estáticas.

Seguir essas recomendações para o silo reduzirá muito os tempos de descarga. Tempos de bombeamento de 90 a 120 minutos podem ser esperados. Além disso, o potencial de formação de grumos na sílica ativa durante o descarregamento será minimizado.

6.2 FUMA DE SÍLICA DENSIFICADA A GRANEL

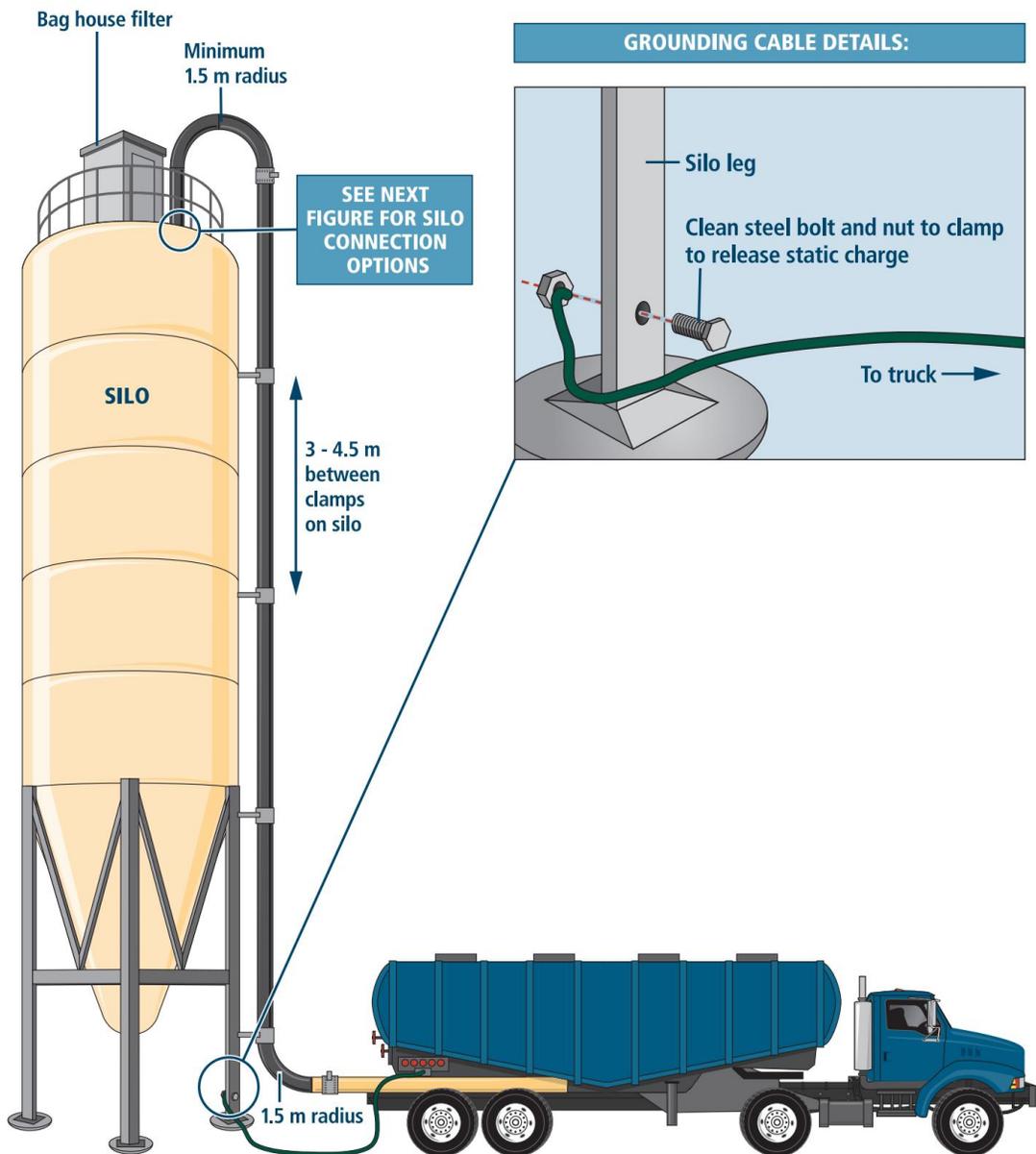
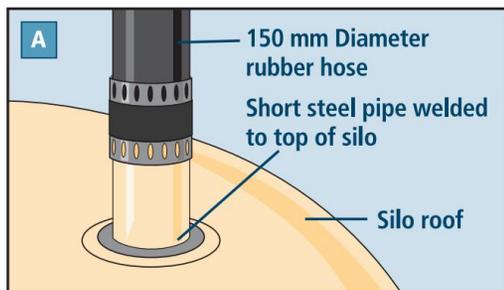


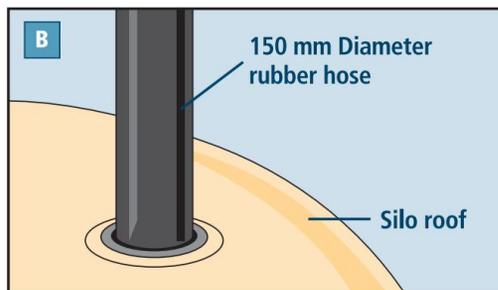
FIGURA 6.4A. Recomendações para silo para armazenamento de sílica ativa a granel adensada. Além disso, observe as recomendações de aterramento para descarga. Consulte a Figura 6.4B para opções de conexão da mangueira de borracha ao topo do silo.

6.2 FUMA DE SÍLICA DENSIFICADA A GRANEL

SILO CONNECTION OPTIONS:



OPTION "A" - Rubber hose connected to steel pipe



OPTION "B" - Rubber hose directly into silo

FIGURA 6.4B. Opções para conectar a mangueira de enchimento de sílica ativa de borracha ao topo do silo de armazenamento.



FIGURA 6.4C. Mangueira de enchimento de borracha conectada ao tubo de aço no topo do silo. Observe a estrutura de suporte para a fabricação da mangueira de borracha.

6.2 FUMA DE SÍLICA DENSIFICADA A GRANEL

6.2.3 Descarga

Descarregar um caminhão-tanque de sílica ativa a granel pode ser uma operação de rotina ou uma longa provação. Esta seção analisa como descarregar sílica ativa a granel em um silo de armazenamento.

O primeiro passo para o descarregamento bem-sucedido é seguir as instruções fornecidas na Seção 6.2.2 sobre o tubo de enchimento do silo. Uma vez que a configuração física esteja correta, aqui está uma lista de verificação a seguir:

- n Use apenas transportadores com experiência em transporte e descarregamento de sílica ativa. n Certifique-se de que o caminhão-tanque esteja conectado ao silo correto.
- n Certifique-se de que o filtro de mangas do silo esteja limpo e operacional. Se a contrapressão do silo exceder 35 kPa, a mangueira de borracha ou o filtro de mangas podem estar entupidos.
- n Aterre o caminhão-tanque para evitar o acúmulo de eletricidade estática. n Não deixe que a pressão de bombeamento exceda 70 kPa. O uso de pressão mais alta obstruirá o caminhão-tanque ou a linha de enchimento para o silo.
- n Não tente apressar o processo de descarga. Fazer isso só aumentará as chances de entupimento do sistema.

As Figuras 6.5A e 6.5B mostram um caminhão-tanque descarregando em uma usina de concreto.

6.2 FUMA DE SÍLICA DENSIFICADA A GRANEL



FIGURA 6.5A. Mangueira de borracha usada para transferir sílica ativa do caminhão-tanque para o silo do produtor.



FIGURA 6.5B. Conectando a mangueira de borracha do tanque à mangueira de enchimento de borracha do silo.

6.2 FUMA DE SÍLICA DENSIFICADA A GRANEL

6.2.4 Loteamento

A dosagem envolve mover a sílica ativa do silo de armazenamento, pesá-la corretamente e depois adicioná-la ao misturador ou caminhão.

A sílica ativa foi transferida com sucesso de silos de armazenamento usando alimentação por gravidade, escorregadores de ar e transportadores helicoidais horizontais. Lembre-se de que a sílica ativa geralmente flui para fora de um silo com mais facilidade do que o cimento portland. Esta característica aumenta a possibilidade de entupimento e empacotamento ao usar um dispositivo de alimentação de rosca inclinada. Reduza a abertura das comportas de alimentação ou use uma válvula rotativa para garantir que não sobrecarregue o sistema.

Ao pesar a sílica ativa, lembre-se de que quantidades relativamente pequenas de material estão sendo pesadas em comparação com outros ingredientes do concreto. Erros de pesagem podem resultar em problemas significativos para um produtor de concreto:

■ Usar muita sílica ativa custará mais do que o estimado para o projeto. ■ O uso de muito pouca sílica ativa resultará no desempenho do concreto não pretendido.

Não assuma que uma planta pesará automaticamente a quantidade correta de sílica ativa. Mesmo que uma usina esteja operando dentro das tolerâncias estabelecidas pela ASTM C94, é perfeitamente possível atender às tolerâncias e não ter a quantidade correta de sílica ativa no concreto.

Muitas das plantas mais novas têm tolerâncias muito mais rígidas do que aquelas exigidas pela ASTM C94 e não apresentam problemas. Se houver alguma dúvida sobre a precisão de uma planta, verifique com o fabricante da planta antes de iniciar um projeto de sílica ativa.

Para minimizar o potencial de problemas durante a pesagem, alguns produtores pesam a sílica ativa antes dos outros materiais cimentícios. Revise a planta para determinar se tal prática seria apropriada.

Uma vez resolvidas as questões relativas à pesagem da sílica ativa, a produção de concreto será praticamente "normal". Adicione a sílica ativa lentamente junto com os outros materiais cimentícios enquanto mistura os outros ingredientes do concreto. Não adicionar sílica ativa a um misturador central ou caminhão betoneira sem a presença de agregados e água. Siga as instruções na próxima seção sobre a possível retenção de água ou misturas químicas para manter uma queda apropriada para a mistura.

6.2 FUMA DE SÍLICA DENSIFICADA A GRANEL

6.2.5 Mistura

O segredo para obter os benefícios do uso de sílica ativa é garantir que a sílica ativa seja dispersa uniformemente por todo o concreto. Esta dispersão só pode ser alcançada se o concreto for adequadamente misturado.

Aqui estão algumas dicas para misturar:

- n Não sobrecarregue os caminhões. Recomendamos que as cargas sejam restritas à capacidade nominal de mistura dos caminhões, que é definida pela ASTM C 94 como 63 por cento do volume do tambor. Isso é importante mesmo para usinas de mistura central porque pode ser necessário realizar uma mistura adicional do concreto de sílica ativa uma vez que esteja no caminhão.
- n Uma vez que o concreto esteja no caminhão, misture por pelo menos 100 revoluções na velocidade de mistura. Tabela 6.1 mostra os tempos mínimos de mistura recomendados.
- n Não misture em uma queda muito alta. A melhor dispersão ocorrerá se a mistura for feita inicialmente em 50 a 100 mm de abatimento. Este abatimento mais baixo permitirá a ação de mistura que ajuda a eliminar qualquer sílica ativa ou bolas de cimento. Em quedas mais altas, as bolas tendem a flutuar e não são esmagadas. Depois que o concreto estiver adequadamente misturado, ajuste o abatimento conforme necessário. Adicione mais 30 revoluções após adicionar qualquer mistura química adicional.
- n Conforme o trabalho avança, pode ser apropriado aumentar o tamanho da carga ou reduzir a mistura extra. Faça tais ajustes com base nos resultados de testes concretos obtidos. Conforme discutido na Seção 6.1, o teste de uniformidade do misturador pode ser útil, mas não confie inteiramente nos resultados obtidos de tal teste.

6.2 FUMA DE SÍLICA DENSIFICADA A GRANEL

TABELA 6.1

RELAÇÕES BÁSICAS DE MISTURA: CAMINHÕES E CENTRAIS	
BITCHEIRAS DE CAMINHÕES	
VELOCIDADE DO MISTURADOR*	HORA DE OBTER 100 REVOLUÇÕES
15	6 minutos 40 segundos
16	6 minutos 15 segundos
17	5 minutos 54 segundos
18	5 minutos 34 segundos
19	5 minutos 16 segundos
20	5 minutos 00 segundos

*Conforme recomendação do fabricante.

MISTURADORES CENTRAIS	
TAMANHO DO BATCH	TEMPO MÍNIMO DE MISTURA POR ASTM C94
5m ³ _	1 + (4 × 15) = 2 minutos e 00 segundos
6m ³ _	1 + (5 × 15) = 2 minutos e 15 segundos
7 m ³	1 + (6 × 15) = 2 minutos e 30 segundos
8 m ³	1 + (7 × 15) = 2 minutos e 45 segundos
9 m ³	1 + (8 × 15) = 3 minutos e 00 segundos
10 m ³	1 + (9 × 15) = 3 minutos e 15 segundos

NÃO ATALHE O TEMPO DE MISTURA!

NÃO MISTURE MAIS CONCRETO DO QUE A CAPACIDADE DE MISTURA NOMINAL DE CAMINHÃO OU CENTRAL MIXER!

6.2 FUMA DE SÍLICA DENSIFICADA A GRANEL

6.2.6 Outras Preocupações

Um número muito pequeno de produtores relatou problemas com pedaços de sílica ativa aparecendo no concreto. Se deixados no concreto em um clima sujeito a congelamento e degelo, esses pedaços irão absorver água, congelar e expandir. Essa expansão resultará em popouts muito semelhantes aos causados por partículas de agregados porosos.

Alguns casos de tais falhas podem ser atribuídos a problemas de descarga da sílica ativa de um caminhão-tanque para um silo. Os silos tinham tubos de enchimento de aço entupidos ou algum tipo de placa defletora. Ambas as situações resultaram no acúmulo de sílica ativa nas tubulações ou no próprio silo. A sílica ativa acumulada cai da parede do silo ou da tubulação e acaba no concreto. Uma indicação de possíveis problemas é a necessidade de “bater” em um tubo de enchimento de aço repetidamente com um martelo durante o descarregamento. Essa ação pode fazer com que a sílica ativa que está se acumulando nas paredes do tubo se desfaça em pedaços e flua para o silo.

Outros casos desses popouts foram atribuídos a lotes impróprios que resultaram na formação de bolas de sílica ativa. Essas bolas não se quebraram no caminhão e foram encontradas no concreto endurecido.

6.3 SÍLICA DENSIFICADA EM SACO FUME

A sílica ativa densificada ensacada é o mesmo produto que é vendido e entregue a granel. Este formulário de produto destina-se ao uso em projetos menores, onde um tanque cheio de sílica ativa pode não ser necessário. Além disso, a sílica ativa densificada ensacada pode ser usada em projetos onde não há silo disponível para armazenar entregas a granel de sílica ativa densificada.

A sílica ativa ensacada está disponível em sacos “repolpáveis” ou “triturados” de 11,4 kg. Desde a introdução desses sacos, milhões de metros cúbicos de concreto foram produzidos usando sílica ativa adicionada como sacos fechados.

Estes sacos são destinados a serem adicionados diretamente em uma central ou caminhão betoneira sem abertura conforme Figura 6.6. Os sacos são projetados para se desintegrar por meio de uma combinação de umedecimento e trituração do papel durante a mistura do concreto.

Desde a sua introdução, esses sacos passaram por várias modificações com o objetivo de torná-los mais facilmente repolpáveis. Essas modificações incluíram a redução do número de camadas de papel e a modificação do design dos cantos e bicos de enchimento para reduzir a espessura dessas áreas. Como era de se esperar, há uma compensação entre tornar os sacos mais fáceis de desintegrar e fortes o suficiente para proteger a sílica ativa durante o transporte e o manuseio. Acredita-se que as bolsas atualmente disponíveis sejam tão fracas quanto prudente.



FIGURA 6.6. Adição de sacos repolpáveis de sílica ativa densificada diretamente ao caminhão betoneira. Consulte a Seção 6.3 para obter as precauções relativas a bolsas fechadas. Observe o uso de máscara contra poeira e óculos de segurança. Consulte o Capítulo 9 para recomendações de segurança pessoal.

6.3 SÍLICA DENSIFICADA EM SACO FUME

6.3.1 Envio

Esses sacos geralmente são embalados em um palete (Figura 6.7) e enviados por meios apropriados, dependendo do volume de material encomendado.



FIGURA 6.7. Silica ativa ensacada.

6.3 SÍLICA DENSIFICADA EM SACO FUME

6.3.2 Requisitos de Armazenamento

Armazene este material como qualquer outro material cimentício em sacos. Isso significa manter o material seco e protegido de danos físicos aos sacos.

Não há prazo de validade associado à sílica ativa na forma densificada. Se o material molhar não haverá reação de hidratação nas mangas como o cimento portland. No entanto, os aglomerados de sílica ativa podem se tornar mais difíceis de dispersar quando adicionados ao concreto. Se os sacos estiverem danificados, será difícil ou impossível verificar se a quantidade correta de sílica ativa está sendo adicionada por metro cúbico de concreto.

6.3.3 Descarga

Use quaisquer meios normalmente usados para manusear materiais paletizados.

6.3.4 Loteamento

Os sacos repolpáveis são destinados a serem adicionados diretamente em uma central ou caminhão betoneira sem abrir. Os sacos são projetados para se desintegrar por meio de uma combinação de umedecimento e trituração do papel durante a mistura do concreto. Conforme discutido abaixo na Seção 6.3.6, em alguns casos pode ser apropriado abrir os sacos e despejar a sílica ativa no concreto, em vez de adicionar os sacos fechados. A Figura 6.8 mostra sílica ativa ensacada sendo esvaziada em um caminhão betoneira. As recomendações para adicionar bolsas fechadas ou abertas são dadas na Tabela 6.2. As instruções variam um pouco, dependendo se uma planta de mistura central ou uma planta de batelada está sendo usada.



FIGURA 6.8. Esvaziando um saco de sílica ativa densificada em uma betoneira.

6.3 SÍLICA DENSIFICADA EM SACO FUME

TABELA 6.2

RECOMENDAÇÕES PARA BATERIA DE SÍLICA FUME EM SACOS	
<p>USO DE SACOS REPULPÁVEIS</p> <p>PLANTA DE MISTURA CENTRAL</p> <p>Adicionar sacos ao misturador central com outros ingredientes</p> <hr/> <p>n Limite o tamanho da carga — veja a nota.</p> <p>n Selecione o número apropriado de sacolas para o volume de concreto produzido. Se necessário, arredonde para o número inteiro de sacos mais próximo. n Adicionar sacos fechados ao misturador central simultaneamente com outros ingredientes da mistura. n Jogar concreto no caminhão. n Misture bem o concreto no caminhão, pelo menos 100 revoluções na velocidade de mistura.</p> <hr/> <p>MISTURADORA CENTRAL OU CAMINHÕES MISTURADORES</p> <p>Adicionando sacos no caminhão depois que o concreto é jogado no caminhão</p> <hr/> <p>n Limite o tamanho da carga — veja a nota.</p> <p>n Selecione o número apropriado de sacolas para o volume de concreto produzido. Se necessário, arredonde para o número inteiro de sacos mais próximo. n Mistura central: Dose e misture no misturador central como faria normalmente. Pode ser necessário reter um pouco de HRWRA se a mistura estiver muito úmida sem a sílica ativa. Solte o concreto no caminhão.</p> <p>n Mistura de caminhão: Lote como faria normalmente. Solte os ingredientes no caminhão.</p> <p>n Adicionar sacos fechados de sílica ativa sobre o concreto do caminhão. n Misture bem o concreto no caminhão, pelo menos 100 revoluções na velocidade de mistura. n Ajuste o abatimento conforme necessário para o nível desejado.</p> <hr/> <p style="text-align: center;">LEMBRE-SE DA</p> <p style="text-align: center;">MISTURA: Consulte as recomendações na Seção 6.3.5</p> <hr/> <p style="text-align: center;">LIMITE O TAMANHO DA</p> <p style="text-align: center;">CARGA: Consulte as recomendações na Seção 6.3.5</p>	<p>USANDO SACOS ABERTOS</p> <p>MISTURADORA CENTRAL OU CAMINHÕES MISTURADORES</p> <p>Adicionando sílica ativa através da planta</p> <hr/> <p>n Limite o tamanho da carga — consulte a observação . n Selecione o número apropriado de sacolas para o volume de concreto produzido. Se necessário, arredonde para o número inteiro de sacos mais próximo. n Esvazie os sacos de sílica ativa na superfície grossa ou agregado fino. Ajuste os pesos dos lotes agregados para considerar o peso da sílica ativa.</p> <p style="text-align: center;">OU</p> <p>n Esvazie os sacos de sílica ativa na tremonha de pesagem de cimento. n Mistura central: Dose e misture no misturador central como você normalmente faria. Pode ser necessário reter um pouco de HRWRA se a mistura estiver muito úmida sem a sílica ativa. Solte o concreto no caminhão.</p> <p>n Mistura de caminhão: Lote como faria normalmente. Solte os ingredientes no caminhão.</p> <p>n Misture bem o concreto no caminhão, pelo menos 100 revoluções na velocidade de mistura. n Ajuste o abatimento conforme necessário para o nível desejado.</p> <hr/> <p>MISTURADORA CENTRAL OU CAMINHÕES MISTURADORES</p> <p>Esvaziar sacos no caminhão depois que o concreto é jogado no caminhão</p> <hr/> <p>n Limite o tamanho da carga — veja a nota.</p> <p>n Selecione o número apropriado de sacolas para o volume de concreto produzido. Se necessário, arredonde para o número inteiro de sacos mais próximo. n Mistura central: Dose e misture no misturador central como você normalmente faria. Pode ser necessário reter um pouco de HRWRA se a mistura estiver muito úmida sem a sílica ativa. Solte o concreto no caminhão.</p> <p>n Mistura de caminhão: Lote como faria normalmente. Solte os ingredientes no caminhão.</p> <p>n Sacos vazios de sílica ativa em cima de concreto em caminhão. n Misture bem o concreto no caminhão, pelo menos 100 revoluções na velocidade de mistura. n Ajuste o abatimento conforme necessário para o nível desejado.</p>

6.3 SÍLICA DENSIFICADA EM SACO FUME

6.3.5 Mistura

O segredo para obter os benefícios do uso de sílica ativa é garantir que a sílica ativa seja dispersa uniformemente por todo o concreto. Esta dispersão só pode ser alcançada se o concreto for adequadamente misturado.

Ao adicionar sacos fechados de sílica ativa diretamente ao concreto, uma mistura completa é extremamente crítica para dispersar a sílica ativa e destruir os sacos.

Aqui estão algumas dicas para misturar:

- n Não sobrecarregue os caminhões. Recomendamos que as cargas sejam restritas à capacidade nominal de mistura dos caminhões, que é definida pela ASTM C94 como 63 por cento do volume do tambor. Isso é importante mesmo para usinas de mistura central porque pode ser necessário realizar uma mistura adicional do concreto de sílica ativa uma vez que esteja no caminhão.
- n Uma vez que o concreto esteja no caminhão, misture por pelo menos 100 revoluções na velocidade de mistura. Tabela 6.1 mostra os tempos mínimos de mistura recomendados.
- n Não misture em uma queda muito alta. A melhor dispersão ocorrerá se a mistura for feita inicialmente em 50 a 100 mm de abatimento. Este abatimento mais baixo permitirá a ação de mistura que ajuda a eliminar qualquer sílica ativa ou bolas de cimento. Em quedas mais altas, a sílica ativa ou as bolas de cimento tendem a flutuar e não são esmagadas. Depois que o concreto estiver adequadamente misturado, ajuste o abatimento conforme necessário. Misture mais 30 revoluções após adicionar qualquer mistura química adicional.
- n À medida que o trabalho avança, pode ser apropriado aumentar o tamanho da carga ou reduzir o tempo extra de mistura. Faça tais ajustes com base nos resultados do teste para o concreto. Conforme discutido na seção 6.1, o teste de uniformidade do misturador pode ser útil, mas não confie inteiramente nos resultados obtidos de tal teste.

6.3 SÍLICA DENSIFICADA EM SACO FUME

6.3.6 Outras Preocupações

A SFA está ciente de vários casos em que os sacos falharam em se desintegrar como pretendido.

O resultado é o aparecimento de fragmentos de papel na superfície do concreto. Este problema parece ser particularmente persistente durante a construção de obras planas, como tabuleiros de pontes.

Acreditamos que o problema seja causado por umedecimento e moagem inadequados do papel durante a mistura do concreto. O problema é particularmente evidente em misturas de concreto que têm um w/cm muito baixo, que contêm um pequeno agregado graúdo de tamanho máximo, como 13 mm, ou que contêm agregados arredondados. Os misturadores de concreto do tipo panela também são muito propensos a problemas com esses sacos.

A solução para esta situação é simples: se houver dúvidas sobre o desempenho das sacolas, faça testes para determinar se as sacolas se deteriorarão nas condições e materiais que serão usados em um projeto específico. O teste deve seguir os seguintes passos:

- n Faça concreto usando materiais de projeto e misturadores de projeto (para concreto misturado com caminhão, teste todos caminhões a serem usados)
- n Simular o tempo de transporte que será esperado
- n Descarregar o concreto e procurar fragmentos de papel

Se fragmentos forem vistos ou se houver qualquer dúvida de desempenho, **NÃO** adicione os sacos diretamente.

Em vez disso, simplesmente esvazie os sacos no misturador, seguindo as instruções da Tabela 6.2.

7

COLOCAR, CONSOLIDAR, ACABAMENTO E CURA CONCRETO DE SÍLICA FUME

Colocar e consolidar concreto contendo sílica ativa é essencialmente o mesmo que para concreto sem

sílica ativa. O acabamento do concreto de sílica ativa para tabuleiros de pontes e outros trabalhos planos geralmente é feito sem os períodos de espera associados às práticas tradicionais de acabamento.

A cura deve começar imediatamente para proteger o concreto da secagem.

Este capítulo analisa o concreto de sílica ativa do ponto de vista do empreiteiro

responsável por trabalhar com o material. As áreas abrangidas são aquelas pelas

quais o empreiteiro é normalmente responsável: colocação, consolidação, acabamento e cura. O capítulo começa com uma análise da secagem do concreto, quer ele contenha sílica ativa ou não.

O objetivo das recomendações apresentadas neste capítulo é alcançar as propriedades do concreto endurecido que levaram um especificador ou proprietário a selecionar o concreto de sílica ativa para uma estrutura. Este objetivo só pode ser alcançado seguindo de perto as boas práticas aqui apresentadas.

7.1 Considerações Gerais	120
7.1.1 Coordenação	120
7.1.2 Considerações Pré-Colocação.....	121
7.1.3 Concreto Formado de Sílica-Fumaça.....	122
7.2 Posicionamento e Consolidação.....	123
7.3 Secagem do Concreto.....	124
7.3.1 Sangramento	124
7.3.2 Secagem da Superfície.....	124
7.3.3 Resultados da Secagem	127
7.3.4 Proteger contra o ressecamento.....	130
7.4 Terminando os decks da ponte	134
7.4.1 Determinar o Grau de Acabamento Necessário	134
7.4.2 Conduza uma conferência de pré-colocação.....	134
7.4.3 Conduza uma colocação experimental.....	134
7.4.4 Preparação de Superfície para Overlays	136
7.4.5 Aplicar Bond Coat.....	137
7.4.6 Colocar o Concreto	138
7.4.7 Consolidação e Acabamento do Concreto	139
7.4.8 Texturizar a Superfície.....	140
7.4.9 Proteger e Curar a Superfície	142

7

COLOCAR, CONSOLIDAR, ACABAMENTO E CURA CONCRETO DE SÍLICA FUME

(contínuo)

7.5 Acabamento de Estruturas de Estacionamento e Outros Planos	145
7.5.1 Determinar o Grau de Acabamento Necessário	147
7.5.2 Realizar uma conferência de pré-colocação.....	147
147 7.5.3 Conduza uma colocação de teste..	147
7.5.4 Colocação e Consolidação do Concreto	149
7.5.5 Executar a flutuação de alta inicial	150
150 7.5.6 Permitir que o concreto termine a sangria e Ganhar Força	150
151 7.5.7 Executar a flutuação final e alisamento.....	151
151 7.5.8 Aplicar textura de superfície	151
152 7.5.9 Aplicar Cura/Secagem Intermediária Proteção	152
154 7.5.10 Aplicar Cura Final.....	154
7.6 Cura.....	156
8.6.1 Recomendações da Associação de Fumo de Sílica	156
8.6.2 A Cura Afeta a Durabilidade da Superfície.....	157
8.6.3 Cura Versus Proteção.....	157
8.6.4 Cura e Rachadura.....	158
8.6.5 Proteção no inverno	158
7.7 Concreto pré-moldado.....	159
7.8 Preocupações Diversas.....	160
7.8.1 Corte de Juntas.....	160
7.8.2 Protensão de Cordoalhas Pós-tensionadas	160
160 7.8.3 Pisos com espátula dura	160
7.8.4 Pintura Após a Cura.....	161

7.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Na maioria dos aspectos, trabalhar com concreto de sílica ativa não é diferente de trabalhar com concreto sem sílica ativa. A exceção mais notável a esta afirmação está no acabamento do concreto.

No entanto, se o processo de acabamento for abordado conforme apresentado neste manual, as diferenças associadas ao concreto de sílica ativa podem, na verdade, ser transformadas em uma vantagem para o empreiteiro.

Aqui estão alguns itens gerais a serem considerados:

7.1.1 Coordenação

É fundamental que haja uma boa coordenação entre o empreiteiro que trabalha com o concreto e o fornecedor do concreto.

Mudanças relativamente pequenas nas propriedades frescas do concreto podem fazer diferenças significativas no esforço necessário para obter o concreto colocado e acabado.

Alguns dos itens a serem considerados:

n Slump, No. 1. Uma boa regra é começar com um abatimento que seja cerca de 50 mm mais alto do que o que seria usado para concreto sem sílica ativa na mesma colocação. Este aumento na queda permite a coesão adicional do concreto de sílica ativa. Não se preocupe com a segregação - é preciso um aumento muito grande na queda para produzir segregação na sílica ativa concreto.

n Slump, No. 2. Geralmente é melhor colocar no abatimento mais alto que seja prático para as condições reais do projeto. Quanto maior o abatimento, mais fácil é fechar a superfície do concreto durante a pavimentação e flutuação do touro. O fator limitante para a colocação do tabuleiro da ponte ou do trabalho plano geralmente será qualquer declive envolvido na colocação. Use o abatimento mais alto que aguentará na inclinação que está sendo colocada.

n Viscosidade. Os finalizadores frequentemente relatam que o concreto de sílica ativa é "pegajoso" e difícil de trabalhar. A chamada "aderência" é causada pelo aumento da viscosidade do concreto que é inerente ao alto teor de materiais cimentícios, misturas de baixo teor de água que utilizam superplastificantes para uma queda trabalhável induzida quimicamente. A experiência tem mostrado que a pegajosidade pode resultar da interação da sílica ativa e alguns aditivos químicos (reduzidores de água e superplastificantes) que estão no concreto. Uma abordagem é simplesmente

7.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

substituir uma mistura química por outra de química diferente. As misturas à base de policarboxilato são geralmente muito eficazes como substitutos. Outra abordagem é remover cerca de um terço do superplastificante e substituí-lo por uma quantidade igual de um redutor de água intermediário. Não tenha medo de experimentar diferentes combinações de aditivos para obter o melhor concreto possível para o projeto. Outra consideração na viscosidade pode ser a classificação e a quantidade de agregado miúdo, pois a classificação do agregado miúdo também pode influenciar a viscosidade geral do concreto. Pode ser útil alterar a proporção de agregado fino para grosso para incluir agregado mais grosso. Em alguns casos, mudar a fonte do agregado miúdo pode ajudar a reduzir a viscosidade. Uma sugestão final é usar o software de empacotamento de partículas disponível que analisa a classificação de todos os ingredientes do concreto, desde agregados graúdos até materiais cimentícios. Essa abordagem pode ajudar a eliminar o excesso de finos que podem ser responsáveis pela viscosidade. Consulte a discussão adicional sobre aderência na Seção 5.5.

7.1.2 Considerações de pré-colocação

Há dois tópicos que devem ser considerados antes de qualquer colocação de concreto de sílica ativa. Estas são a conferência de pré-colocação e a colocação do teste.

n Conferência de pré-colocação. Uma conferência de pré-colocação é importante para qualquer tipo de trabalho de concreto, mas tal reunião é ainda mais importante para concreto de sílica ativa. Esta é a oportunidade para o empreiteiro delinear todos os planos de colocação, proteção, acabamento e cura do concreto para que todos os envolvidos entendam o que irá ocorrer. É também o momento para o empreiteiro resolver quaisquer questões não respondidas em relação às expectativas do proprietário e do engenheiro. Frequentemente, a conferência de pré-colocação é realizada em conjunto com uma colocação de teste.

Um elemento-chave a ser discutido na conferência de pré-colocação é a taxa de entrega concreta. Um problema típico é colocar muito concreto no local e ter caminhões de volta. Isso é particularmente verdadeiro para coberturas de tabuleiros de pontes ou coberturas de sílica ativa sobre elementos pré-moldados. Nesses tipos de colocação, um pequeno volume de concreto cobrirá uma grande área de superfície.

7.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

n Colocação de teste. É quase imperativo que uma colocação de teste seja realizada antes que o trabalho concreto realmente comece em um projeto. Este posicionamento dá a todos a oportunidade de tirar os “bugs” do sistema e de observar e aprovar todos os procedimentos. Representantes de todas as partes devem estar presentes: proprietário, engenheiro, fornecedor de concreto, fornecedores de materiais e, claro, o empreiteiro. Se a colocação do teste for bem, a próxima etapa é iniciar as colocações reais na estrutura. Alguns dos tópicos que devem ser discutidos durante a colocação do teste incluem:

- 1. Mistura de concreto.** Esta é geralmente a primeira chance para os finalizadores do empreiteiro verem a mistura de concreto. Esta é a chance de ajustar o concreto e o procedimento de colocação. A colocação do teste também é um bom momento para determinar se serão necessários quaisquer ajustes no concreto com base no clima ou nas condições de colocação. Por exemplo, pode ser apropriado solicitar um retardador ou um acelerador sem cloreto, dependendo das condições.
- 2. Abordagem final.** Esta é a oportunidade de experimentar diferentes abordagens e diferentes ferramentas para acabamento do concreto. Determine quais ferramentas funcionam melhor para fechar e terminar a superfície no grau necessário.
- 3. Acabamento aceitável.** Faça com que o proprietário defina a natureza exata do acabamento que será aceitável para o trabalho concreto real. Não deixe a colocação do teste sem tomar essa decisão.
- 4. Proteger o concreto.** É conveniente deixar uma parte do concreto de teste desprotegido contra a secagem para ver a rapidez com que secará e quais podem ser as consequências. Esta também é uma oportunidade para determinar o quão bem diferentes esquemas de proteção funcionarão.

7.1.3 Concreto formado de sílica ativa

Para concretos formados e não acabados, como pilares e paredes, não haverá diferenças entre as práticas normais e as exigidas para o concreto de sílica ativa. Coloque, consolide e proteja o concreto conforme apropriado para a aplicação e condições de trabalho.

Uma queda maior ajudará a colocar o concreto em formas congestionadas com muito aço de reforço.

No entanto, o concreto de alta queda ainda exigirá vibração para remover os vazios de ar. Ao usar concreto de sílica ativa com alta dosagem de superplastificante, não se esqueça de considerar as pressões de forma do concreto fluido.

7.2 COLOCAÇÃO E CONSOLIDAÇÃO

Concreto de sílica ativa foi colocado com sucesso por todos os meios de colocação de concreto. Isso inclui descarga direta de caminhões betoneira, guindaste e caçamba, tremie debaixo d'água e bombeamento.

Dada a natureza das aplicações onde o concreto de sílica ativa tende a ser usado, a grande maioria foi lançada por bomba. No geral, não espere ver nenhuma diferença significativa ao colocar e consolidar o concreto de sílica ativa.

Conforme observado anteriormente na Seção 7.1, é sempre mais fácil trabalhar com um abatimento tão alto quanto possível para um determinado posicionamento. Use um abatimento para concreto de sílica ativa com base nas condições reais de trabalho e não com base em recomendações arbitrárias que provavelmente foram desenvolvidas para concreto sem sílica ativa e superplastificante.

Como muito concreto de sílica ativa é colocado por bomba, há as preocupações usuais sobre a perda de ar. O concreto de sílica ativa não é mais nem menos suscetível à perda de ar do que qualquer concreto sem sílica ativa colocado nas mesmas circunstâncias. Seguindo boas práticas de bombeamento, pode-se esperar uma perda de ar de 1 a 2 por cento passando pela bomba. Caso esteja constatando maior perda de ar, observe os procedimentos e configuração da barra da bomba antes de culpar a mistura de concreto.

Se houver perdas de ar maiores, tenha muito cuidado ao tentar corrigir o problema aumentando o teor de ar do concreto que entra na bomba. O que pode funcionar em um dia pode não funcionar bem no dia seguinte se a configuração da barra for alterada. Consulte ACI 304.2R, *Colocar Concreto por Métodos de Bombeamento*, para obter informações adicionais sobre bombeamento e perda de ar.

O concreto de sílica ativa é um material muito fluido, principalmente se forem seguidas as recomendações relativas ao aumento do abatimento. No entanto, não se engane com a aparente trabalhabilidade - esse concreto ainda precisa ser adequadamente vibrado durante a colocação. Não assuma que uma mesa vibratória irá vibrar o concreto em seções mais profundas, como vigas fundidas integralmente com lajes. Deve ser utilizado um vibrador interno de acordo com as recomendações da ACI. Para obter mais informações, consulte ACI 309R, *Guia para*

Consolidação de Concreto.

7.3 SECAGEM DO CONCRETO

Muito tem sido escrito sobre a tendência do concreto de sílica ativa secar durante a colocação e o acabamento. Esta seção explicará o que realmente está acontecendo e como ajustar o trabalho para acomodar o concreto. As descrições e recomendações nesta seção se aplicam a concreto com e sem sílica ativa.

7.3.1 Sangria

Por causa da área de superfície muito alta de sílica ativa que tende a adsorver água e os teores de água tipicamente muito baixos de misturas de concreto de sílica ativa, há pouca ou nenhuma água de drenagem. Conforme o teor de sílica ativa aumenta ou conforme o teor de água diminui, o sangramento será reduzido ou eliminado. Há aspectos bons e ruins dessa falta de sangramento. Do lado positivo, a falta de sangramento significa que o acabamento pode começar mais cedo e ser concluído mais cedo. Além disso, a água de sangria não se acumulará sob as partículas agregadas e sob as barras de reforço horizontais. Não haverá canais de escoamento de água para cloretos ou outros materiais intrusivos para usar como um "atalho" para entrar no concreto. Do lado negativo, a falta de exsudação significa que o piso de concreto de sílica ativa, sob as condições ambientais apropriadas, secará da superfície para baixo. Essa secagem dificultará o fechamento da superfície do concreto durante o acabamento. A secagem também pode levar a crostas plásticas e, eventualmente, rachaduras por retração plástica.

7.3.2 Secagem da Superfície

Vamos primeiro olhar para as condições ambientais que levam à secagem da superfície do concreto. Existem quatro elementos a serem considerados: temperatura do ar, umidade relativa, temperatura da superfície do concreto e velocidade do vento. Muitos anos atrás, um gráfico foi desenvolvido para estimar como todos esses fatores interagem para contribuir para a secagem do concreto. Este gráfico é mostrado na Figura 7.1. Ao inserir os valores apropriados no gráfico, uma estimativa da perda de umidade em unidades de quilogramas de água por metro quadrado por hora pode ser desenvolvida. A sabedoria convencional apresentada pelo ACI é que, se a perda prevista for inferior a 1,0 kg/m²/h, não haverá problema. Como esse valor foi determinado para concreto sem sílica ativa, muitas recomendações para concreto com sílica ativa usam um valor que é a metade do valor original: 0,5 kg/m²/h.

Muitos especificadores incluem um requisito para usar esta tabela em suas especificações para concreto de sílica ativa. Se a taxa estimada de perda de umidade exceder algum valor especificado, essas especificações requerem alguma forma de proteção para a secagem superficial do concreto.

7.3 SECAGEM DO CONCRETO

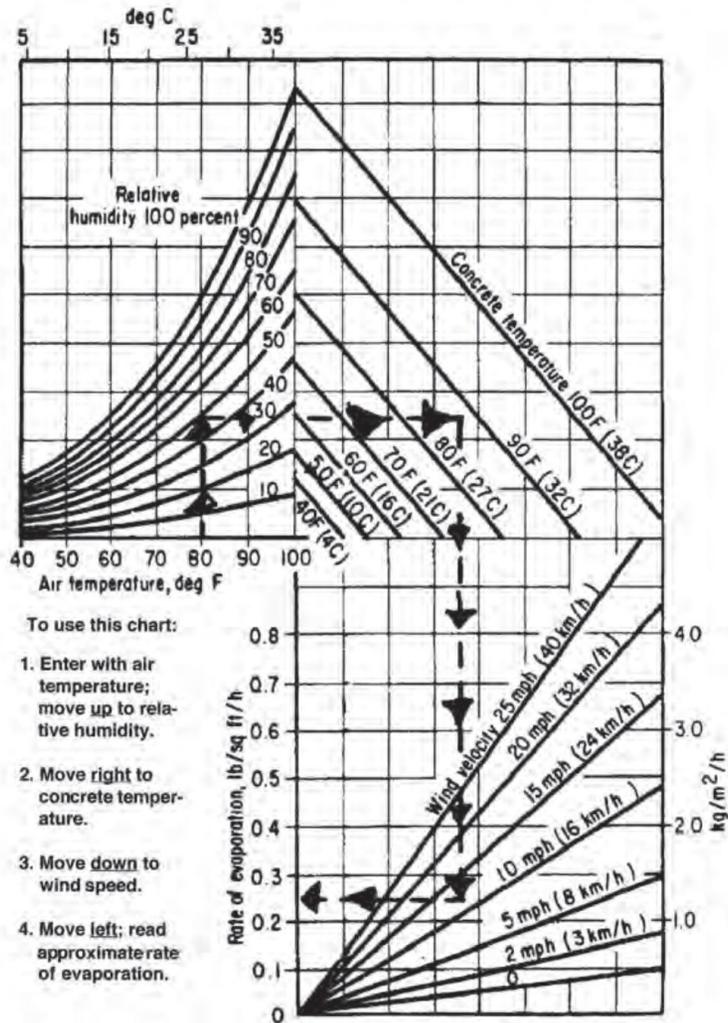


FIGURA 7.1. Gráfico de estimativa de evaporação ACI. Fonte: ACI 308R, *Guia de Cura do Concreto*.

No entanto, é importante olhar para esta abordagem para estimar a evaporação um pouco mais de perto.

A Tabela 7.1 apresenta as recomendações para realmente medir os parâmetros envolvidos.

Normalmente, as medições não são feitas conforme recomendado; em vez disso, os dados meteorológicos são obtidos ligando para o escritório meteorológico local. Os dados são então plotados e as decisões são tomadas sobre colocar ou não concreto e se proteger ou não proteger o concreto.

Todos no trabalho estão satisfeitos porque os requisitos da especificação estão sendo atendidos.

No entanto, os requisitos reais de prevenção da secagem do concreto podem não ser atendidos, e é isso que causa problemas aos empreiteiros com formação de crostas e rachaduras por retração plástica.

7.3 SECAGEM DO CONCRETO

TABELA 7.1

ONDE MEDIR ENTRADA PARA GRÁFICO DE EVAPORAÇÃO
n Temperatura do ar: 1,2 – 1,8 m acima da superfície, à sombra
n Temperatura da água: igual à temperatura do concreto
n UR: 1,2 – 1,8 m acima da superfície, na sombra, contra o vento
n Velocidade do vento: 0,5 m acima da superfície

Fonte: ACI 308R, Guia de Cura do Concreto.

A melhor abordagem é combinar o uso do gráfico com um pouco de bom senso. Primeiro, vá em frente e obtenha os valores da fonte meteorológica local e use o gráfico para desenvolver uma estimativa. Mas não confie apenas na estimativa do gráfico, principalmente se o valor estimado estiver próximo do limite de 0,5 ou 1,0 kg/m² /h.

Identifique os detalhes do local do projeto real. O local está exposto ao sol direto, a umidade é baixa e o vento, a temperatura ou ambos estão aumentando? Independentemente do que o gráfico possa indicar, essas são condições que podem resultar em rápida secagem da superfície. Se a temperatura e a umidade forem altas, os trabalhadores podem se sentir desconfortáveis. No entanto, a alta umidade ajudará a evitar que o concreto seque. Quanto mais desconfortáveis os trabalhadores estiverem pessoalmente com a temperatura e a umidade, menor a probabilidade de o concreto secar. **É sempre melhor apostar no lado seguro ao decidir se deve fornecer proteção contra o ressecamento do concreto.**

Um pensamento adicional sobre a secagem é apropriado. Como o clima fica mais quente a cada verão, muitos empreiteiros ou fornecedores de concreto adicionam um retardador para aumentar o tempo de trabalho de seu concreto. Sob as circunstâncias apropriadas, esta abordagem pode ser correta. No entanto, para trabalhos planos de concreto, o uso de um retardador geralmente não é correto. O retardador retardará as reações iniciais de hidratação, o que exporá o concreto às condições de secagem por mais tempo.

O retardador, em alguns casos, pode na verdade piorar a situação em vez de melhorá-la.

7.3 SECAGEM DO CONCRETO

7.3.3 Resultados da Secagem

Existem duas consequências da secagem do concreto - crostas plásticas e rachaduras por retração plástica.

n Crosta de plástico — Os finalizadores de concreto costumam dizer: “Meu concreto está pegando de cima para baixo”. O concreto da superfície pode, na verdade, estar endurecendo mais rapidamente do que o concreto subjacente se for um dia ensolarado e a temperatura da superfície for alta. Ou, o concreto da superfície pode estar simplesmente secando se as condições ambientais forem propícias à secagem e se houver pouca ou nenhuma água de drenagem chegando à superfície. Em ambos os casos, uma crosta se formará na superfície do concreto conforme mostrado na Figura 7.2. Se um finalizador tocar ou pisar no concreto, parecerá que está endurecendo e que é hora de começar a flutuar e alisar. Mas, na verdade, apenas a superfície está ficando mais rígida e o centro do concreto ainda pode estar muito macio. O acabamento nessas condições normalmente resultará em uma superfície muito ondulada que não atenderá a nenhum requisito de suavidade ou planicidade.

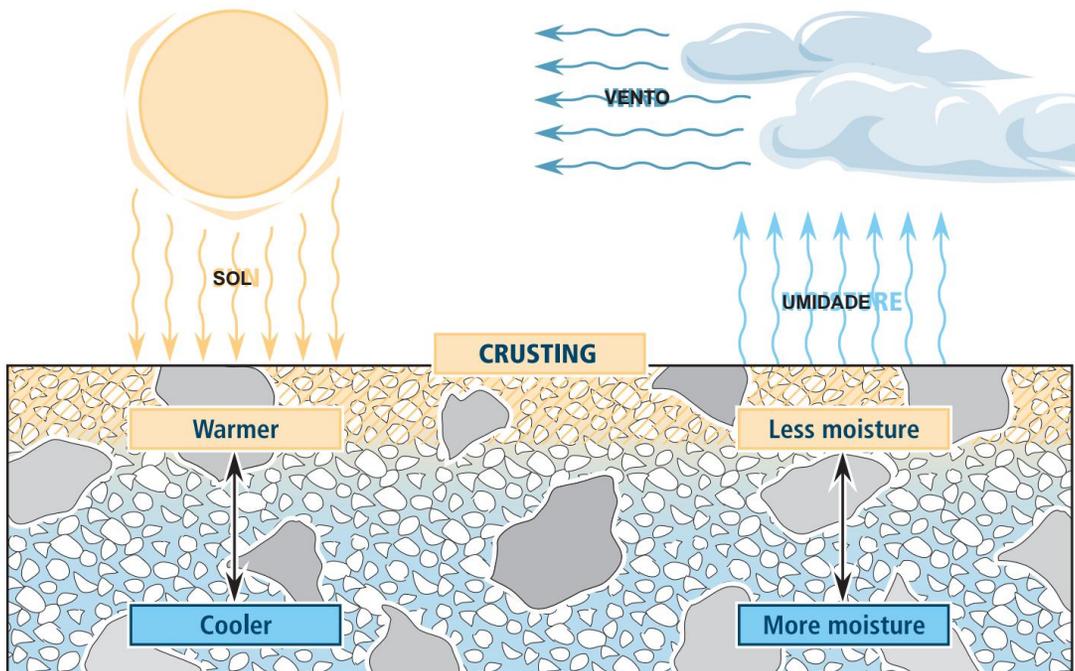


FIGURA 7.2. Crosta da superfície de concreto. Em algumas circunstâncias, a formação de crostas pode levar a rachaduras no plástico.

7.3 SECAGEM DO CONCRETO

Depois que a superfície começa a secar, é muito difícil se recuperar da situação. A tendência é chegar ao concreto “antes que fuja”. Água ou “auxílio de acabamento” é frequentemente aplicado à superfície, o que pode resultar em uma superfície de concreto menos durável do que o pretendido.

n Rachaduras por retração plástica — Em algumas circunstâncias, ao invés de crostas na superfície, rachaduras aparecerão. Normalmente, essas rachaduras são orientadas aleatoriamente e normalmente não vão até a borda de uma laje. Além disso, eles geralmente não são de profundidade total. A Figura 7.3 mostra trincas de retração plástica em concreto de sílica ativa. Exatamente por que rachaduras ocorrerão em alguns locais e crostas em outros não está claro.

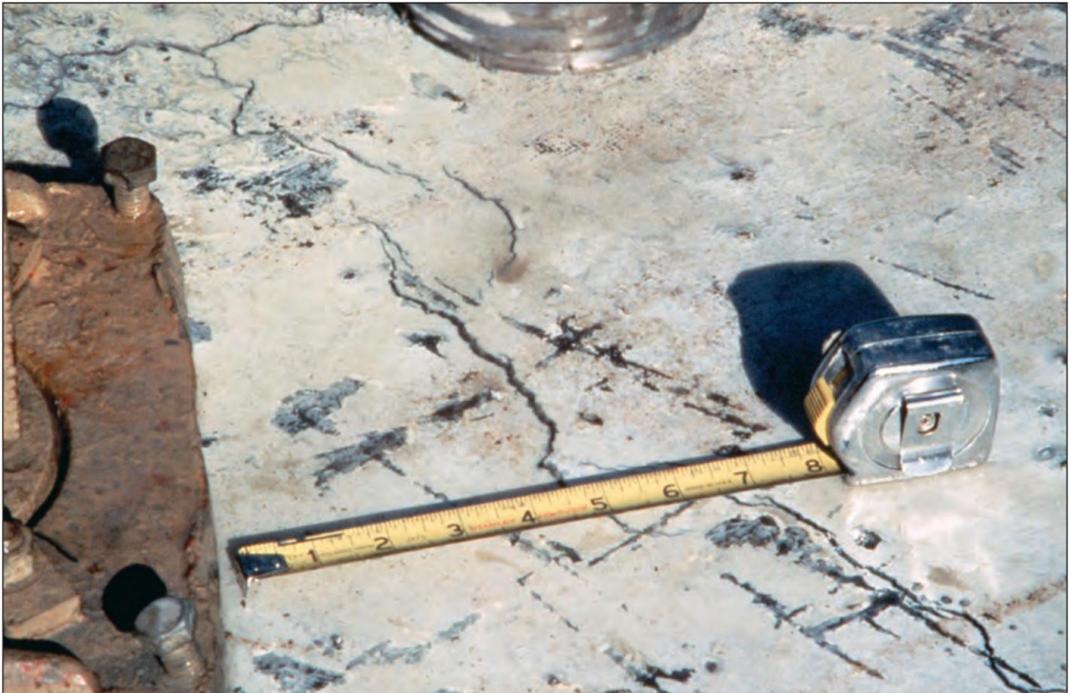


FIGURA 7.3. Fissuras de retração plástica em concreto de sílica ativa.

7.3 SECAGEM DO CONCRETO

Quando ocorre a secagem que leva à formação de crostas plásticas ou rachaduras por retração plástica?

Observe o procedimento típico de acabamento apresentado na Tabela 7.2. O momento em que o concreto tem maior probabilidade de secar e sofrer problemas é durante o período inicial de espera entre a primeira passagem do bote flutuante e o início efetivo do boteamento e alisamento. Este período geralmente é de várias horas enquanto se espera que o concreto comece a endurecer. O tempo real irá variar dependendo do tipo de colocação, proporções da mistura, teor de cimento e sílica ativa, presença de outras pozolanas, temperatura do concreto e uso de aditivos aceleradores ou retardadores. Para tabuleiros de pontes, o período de espera pode ser significativamente menor do que para outros tipos de trabalho plano. Se as estimativas de perda de umidade suscitam preocupação, é durante esse período inicial de espera que devem ser tomadas medidas para proteger o concreto da secagem.

Um segundo período de dano potencial ocorre entre o passe de acabamento final e o início da cura. Normalmente, o concreto já ganhou resistência suficiente para resistir à fissuração por retração plástica, mas a secagem prolongada após o acabamento resultará em uma superfície menos durável.

TABELA 7.2

PASSOS NO ACABAMENTO DE PLANTA DE CONCRETO
LUGAR — MECANISMO — BULL FLOAT
ESPERE - PERIGO!
FLUTUADOR - ESPANHOL
ESPERE - MENOS PERIGO!
CURA
OS PERÍODOS DE ESPERA SÃO QUANDO O CONCRETO DE SÍLICA FUMA DEVE SER PROTEGIDO DA SECAGEM.
O USO DO PROCEDIMENTO DE ACABAMENTO DE UMA PASSAGEM PODE ELIMINAR OU MINIMIZAR OS PERÍODOS DE ESPERA.

7.3 SECAGEM DO CONCRETO

7.3.4 Proteção contra ressecamento

A Tabela 7.3 apresenta algumas das abordagens comumente recomendadas para proteção contra ressecamento. Das abordagens mostradas, as mais comumente usadas com concreto de sílica ativa são nebulização, usando um retardador de evaporação e usando a técnica de acabamento de uma passagem. Cada um é discutido abaixo.

TABELA 7.3

ABORDAGENS PARA PREVENIR CROSTAS DE PLÁSTICO E PLÁSTICO RACHADURA DE ENCOLHIMENTO
n Conduza o acabamento em uma passagem
n Use retardador de evaporação
n Use nebulização
n Use concreto frio
n Humedecer o subleito
n Erguer quebra-ventos
n Erguer guarda-sóis
n Use fibras sintéticas
n Trabalha à noite
n Cubra o concreto com plástico entre as operações de acabamento
n Consulte ACI 308R, <i>Guia para Cura do Concreto</i> , para recomendações adicionais

n Acabamento em uma passada. A primeira abordagem para prevenir problemas associados à secagem de concreto de sílica ativa é usar a abordagem de acabamento de uma passagem. Este procedimento aproveita a falta de sangramento e elimina o período de espera entre a colocação e o acabamento. O acabamento em uma passagem é descrito na Seção 7.5.

7.3 SECAGEM DO CONCRETO

n Retardadores de evaporação. Esses produtos estão amplamente disponíveis e são usados com frequência. Por muitos anos, os produtos foram promovidos e vendidos como “retardadores de evaporação e auxiliares de acabamento” pelos fabricantes. Essa prática foi reduzida e a maioria das folhas de dados agora se refere aos produtos apenas como retardadores de evaporação. O uso excessivo desses produtos e o acabamento do produto na superfície podem resultar em danos ao concreto.

Como eles devem ser usados? A Figura 7.4 mostra um retardador de evaporação sendo aplicado. Esses produtos formam um filme muito fino na superfície do concreto. Este filme é tecnicamente suposto ter apenas uma molécula de espessura, então os produtos são freqüentemente chamados de materiais “monomoleculares”. Este filme fino manterá a umidade no concreto, mesmo sob condições extremas de secagem. Aplique o retardador de evaporação após a conclusão da flutuação do touro e não perturbe o produto até que a flutuação comece. Se qualquer tipo de ferramenta de acabamento for passada na superfície após a aplicação do retardador de evaporação, o filme será quebrado e não manterá mais a umidade.



FIGURA 7.4. Aplicação de retardador de evaporação ao concreto de sílica ativa para evitar a perda de umidade antes do início da cura.

7.3 SECAGEM DO CONCRETO

n Embaçamento. O objetivo da nebulização é manter uma alta umidade acima da superfície do concreto durante o tempo desde a colocação até a aplicação da cura. Se as condições ambientais causarem preocupação com a secagem, a nebulização deve começar imediatamente após o concreto ser colocado por uma máquina de acabamento ou após a flutuação do touro. Dependendo do tipo de aplicação e do grau de acabamento desejado, pode ser necessário nebulizar entre as passadas de acabamento.

A nebulização é melhor realizada usando um bocal que combina ar comprimido e uma quantidade muito pequena de água. A Figura 7.5A mostra um dispositivo portátil de nebulização sendo usado em uma estrutura de estacionamento e a Figura 7.5B mostra um sistema de nebulização montado em uma máquina de acabamento de pontes. O equipamento pode ser adquirido comercialmente ou pode ser feito no local. Misturs como os usados em um supermercado para produtos hortícolas ou lavadoras de pressão com bico fino têm sido usados com sucesso. A chave é fornecer uma quantidade muito pequena de água em uma névoa muito

Os inspetores frequentemente expressam preocupações com relação aos danos potenciais que a nebulização pode causar à superfície do concreto. Assim como quase qualquer outra prática de construção, a nebulização pode ser abusada e, se isso acontecer, resultará em danos à superfície. Lembre-se, o objetivo da nebulização é aumentar a umidade e não colocar água na superfície que acaba no concreto.

No entanto, se as condições ambientais forem tais que a secagem rápida seja uma preocupação, pode-se esperar que um pouco de água que caia na superfície do concreto evapore rapidamente. Assim como é verdade para qualquer outra operação de colocação, não termine de sangrar a água ou borrifar a água na superfície.



FIGURA 7.5A. Nebulização adequada do concreto de sílica ativa em uma estrutura de estacionamento para aumentar a umidade e evitar a secagem da superfície do concreto.

7.3 SECAGEM DO CONCRETO



FIGURA 7.5B. Equipamento de nebulização montado em máquina de pavimentação. Os bicos de neblina são apontados para cima para que a umidade não seja adicionada à superfície do concreto.

n Controlar as condições ambientais. Tomar medidas para lidar diretamente com as condições ambientais que resultam em secagem rápida pode ajudar a reduzir os problemas de acabamento e deve ser considerado para todas as colocações. Essas etapas são mostradas na Tabela 7.3, começando com o uso de concreto mais frio. Resfriar o subleito ou resfriar as bandejas de metal para colocação do deck reduzirá significativamente a taxa na qual a água sai do concreto. Outras etapas, como trabalhar à noite, na sombra ou controlar o vento, tratam diretamente de questões específicas. Para lajes internas, considere a colocação depois que a estrutura estiver fechada. Foi demonstrado que o uso de fibras sintéticas reduz as rachaduras por retração plástica.

7.4 ACABAMENTO DE CONVÉS DE PONTE

O acabamento de tabuleiros de pontes de concreto com sílica ativa é muito semelhante ao acabamento de tabuleiros de pontes sem sílica ativa. As maiores diferenças são a exigência de passar rapidamente de uma etapa para a outra e a exigência de iniciar a cura imediatamente após o lançamento e o acabamento do concreto. Na verdade, devido ao equipamento disponível, o acabamento de tabuleiros de pontes pode ser feito em uma escala de tempo ainda mais compacta do que outras obras planas. O acabamento de outros tipos de concreto plano de sílica ativa é descrito na Seção 7.5.

Os procedimentos descritos abaixo são os mesmos para posicionamento de profundidade total e sobreposições. A única diferença é a preparação de superfície necessária e a possível exigência de uma camada de ligação para colocações de sobreposição.

As etapas típicas de acabamento do tabuleiro da ponte são mostradas no fluxograma da Figura 7.6. Este fluxograma abrange o concreto de sílica ativa usado em profundidade total ou sobreposição. As etapas mostradas no fluxograma são discutidas abaixo:

7.4.1 Determinar o Grau de Acabamento Necessário

Para tabuleiros de pontes o grau de acabamento requerido normalmente será definido nas especificações do projeto. Lembre-se de que a menor quantidade de trabalho da superfície de concreto geralmente resultará no concreto mais durável

7.4.2 Realizar uma conferência de pré-colocação

Conforme discutido na Seção 7.1.2, esta reunião é a oportunidade de discutir os planos do empreiteiro para todos os aspectos da obra. Não saia da reunião com perguntas sem resposta.

7.4.3 Conduzir uma colocação de teste

Além disso, conforme discutido na Seção 7.1.2, uma colocação de teste é o momento ideal para finalizar todas as decisões relacionadas à finalização. A colocação do ensaio deve ser acompanhada pelos representantes do DOT que tenham autoridade para aceitar a mistura e os procedimentos demonstrados. O empreiteiro deve se comprometer a usar a mesma equipe de acabamento para a colocação experimental e as colocações reais na estrutura. A colocação de teste deve ser grande o suficiente para permitir a demonstração de técnicas realistas de acabamento. Na conclusão da colocação de teste, uma das duas conclusões deve ser alcançada: uma abordagem de acabamento aceitável foi demonstrada e aceita ou a necessidade de uma colocação de teste adicional foi estabelecida.

7.4 ACABAMENTO DE CONVÉS DE PONTE

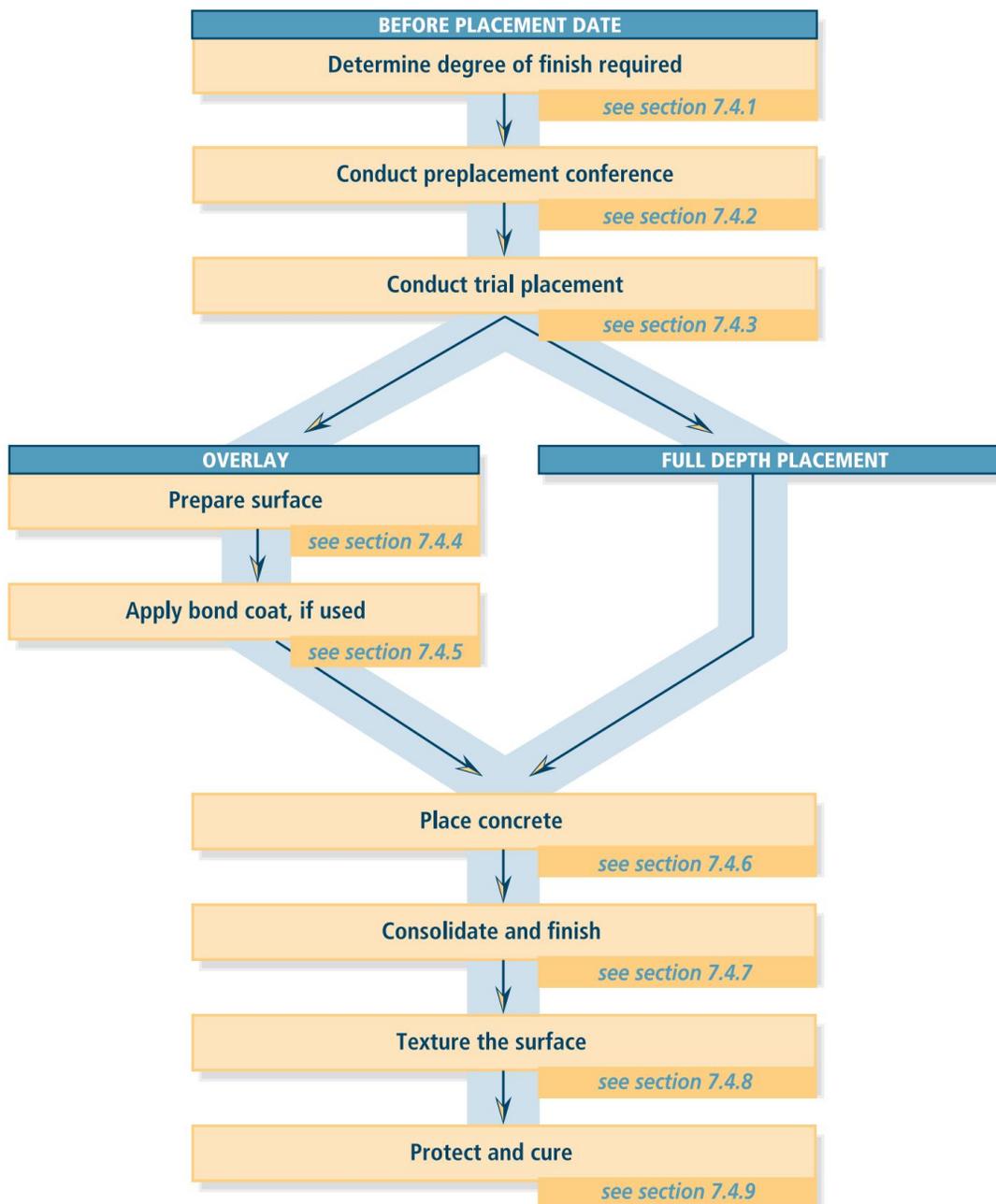


FIGURA 7.6. Etapas de acabamento para tabuleiros de pontes de concreto. As etapas são descritas na seção de texto indicada.

7.4 ACABAMENTO DE CONVÉS DE PONTE

7.4.4 Preparação de Superfície para Sobreposições

Como é verdade para qualquer material de revestimento, a preparação adequada da superfície é crítica para a colocação bem-sucedida de um revestimento de concreto de sílica ativa. Todo concreto danificado deve ser removido e as armaduras corroídas substituídas ou reparadas conforme exigido pelas especificações mostradas na Figura 7.7. Extremo cuidado deve ser tomado para garantir que qualquer concreto deixado no local, ao qual se espera que a camada de revestimento se ligue, não seja danificado. Frequentemente, os overlays falham logo abaixo da linha de aderência devido a danos neste concreto durante as operações de remoção. Geralmente, as fresadoras não devem ser usadas devido ao potencial de microfissuras no substrato. As técnicas de jateamento ou hidrodemolição são preferidas. Consulte o ACI 546.1R, *Guia para Reparo de Superestruturas de Pontes de Concreto*, para uma discussão sobre as técnicas apropriadas de remoção de concreto para colocações de revestimento.



FIGURA 7.7. Plataforma de ponte de concreto preparada para uma cobertura de concreto de sílica ativa. O concreto deteriorado foi removido e o aço de reforço foi limpo para preparar a colocação da cobertura.

7.4 ACABAMENTO DE CONVÉS DE PONTE

Outro problema observado em revestimentos de concreto, com ou sem sílica ativa, é que a superfície do concreto subjacente é muito lisa para que ocorra uma boa aderência mecânica. Uma superfície áspera com partículas de agregado grosso expostas e uma amplitude de superfície de aproximadamente 5 mm é recomendada pela SFA. Um teste ASTM, ASTM E 965, *Método de Teste Padrão para Medição de Macrotextura de Pavimento Usando Técnicas Volumétricas*, (às vezes chamado de “teste de mancha de areia”) pode ser usado para avaliar a preparação da superfície.

Outra abordagem é usar as amostras de rugosidade da superfície preparadas pelo International Concrete Repair Institute.

7.4.5 Aplicar revestimento de ligação

Diferentes estados especificam requisitos diferentes para o uso de um revestimento de ligação entre uma cobertura e o concreto subjacente. Uma camada de ligação típica é preparada como uma argamassa cimentícia. Se uma camada de ligação for especificada, ela deve conter os mesmos materiais cimentícios que o concreto de cobertura. Existem duas áreas onde a argamassa pode se tornar um problema: Primeiro, não faça uma argamassa fraca no local usando um pequeno misturador. Encomende a argamassa do fornecedor de concreto. Em segundo lugar, não permita que a argamassa fique muito à frente da colocação real do concreto. Quando esta situação ocorre, o rejunte vai secar e o intensificador de adesão se torna um redutor de adesão. Alguns estados permitem que a argamassa do próprio concreto seja varrida para o convés antes da colocação. Se esta prática for seguida, certifique-se de remover o agregado que não foi vassourado no convés.

Independentemente de usar ou não uma camada de ligação, certifique-se de que a superfície do concreto que receberá a cobertura esteja limpa. Esta etapa inclui a remoção de qualquer material solto e a verificação de qualquer concreto que possa ter sido danificado, mas não removido durante a remoção do deck existente.

7.4 ACABAMENTO DE CONVÉS DE PONTE

7.4.6 Colocar o Concreto

Para quase todos os tabuleiros de pontes, a colocação do concreto será feita diretamente de um veículo de entrega ou por uma bomba (Figura 7.8). Se estiver bombeando, principalmente se a bomba estiver localizada abaixo do tabuleiro da ponte, não se esqueça das considerações mencionadas na Seção 7.2 sobre a configuração da lança da bomba e perda de ar.



FIGURA 7.8. Concreto de sílica ativa sendo colocado no convés. Observe o uso do vibrador para proporcionar consolidação adicional àquela fornecida pela máquina de acabamento.

7.4 ACABAMENTO DE CONVÉS DE PONTE

7.4.7 Consolidação e Acabamento do Concreto

A maioria das colocações de tabuleiros de pontes usa uma máquina de ponte de serviço pesado para retirar, consolidar, flutuar e flutuar o concreto (Figura 7.9). Quando essas máquinas são configuradas corretamente, não há necessidade de qualquer acabamento manual adicional do concreto. A única preocupação com essas máquinas é que o concreto não deve ser colocado no convés muito à frente da máquina. O DOT do estado de Nova York recomenda um máximo de 1,5 a 2,5 m à frente de a máquina. Esses limites são apropriados; no entanto, sob condições severas de secagem, o limite inferior deve ser usado.



FIGURA 7.9. Máquina de tabuleiro de ponte sendo usada para colocar revestimento de concreto de sílica ativa.

7.4 ACABAMENTO DE CONVÉS DE PONTE

7.4.8 Texturizar a Superfície

Os requisitos para a textura da superfície variam de estado para estado. As Figuras 7.10A e 7.10B mostram um convés sendo escovado ou aparado imediatamente atrás da máquina de acabamento. Alguns estados incorporam um arrasto atrás da máquina de acabamento, enquanto outros exigem o arrasto e posteriormente o corte da serra. Se uma textura for aplicada no momento da colocação do concreto, certifique-se de não deixar o concreto secar durante o processo.



FIGURA 7.10A. Aplicando um acabamento escovado. Após a máquina de acabamento passar sobre a superfície, pode ser necessário algum acabamento manual adicional, particularmente ao longo das bordas da colocação. A texturização com vassoura também pode ser vista nesta foto.

7.4 ACABAMENTO DE CONVÉS DE PONTE

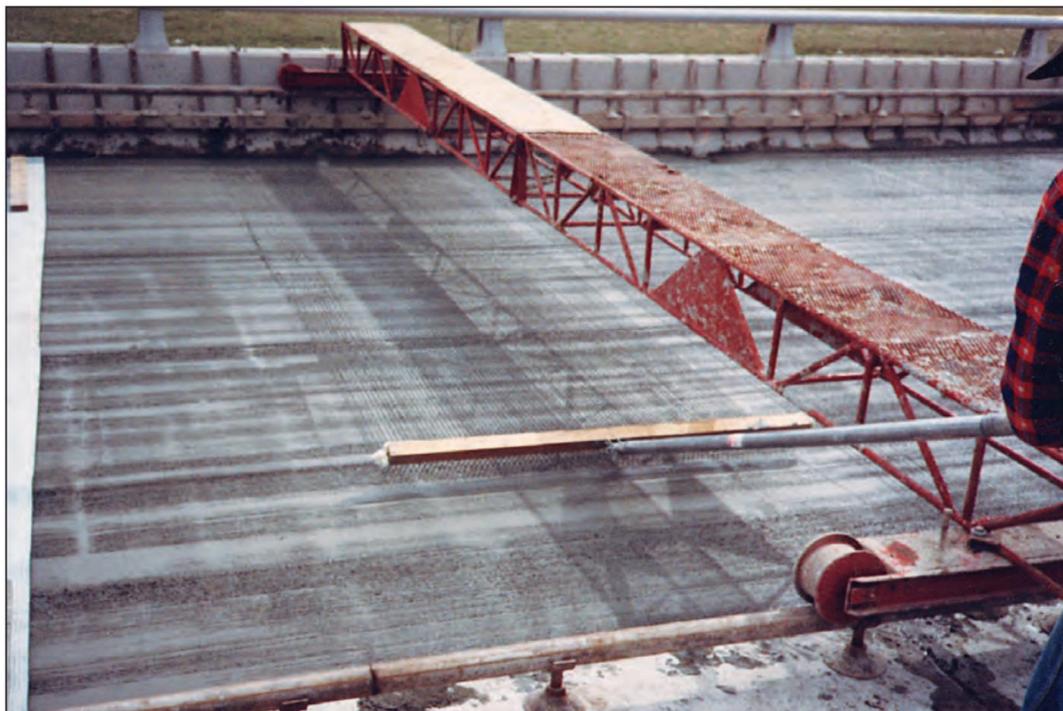


FIGURA 7.10B. Aplicando um acabamento estanhado. Alguns DOTs preferem ter os sulcos retificados após o endurecimento do concreto.

7.4 ACABAMENTO DE CONVÉS DE PONTE

7.4.9 Proteger e Curar a Superfície

Esta é uma das etapas mais críticas para a colocação bem-sucedida de tabuleiros de pontes. Se houver atrasos no processo de colocação-acabamento-texturização, proteja o concreto usando um retardador de evaporação, nebulização ou lona plástica conforme apropriado. Imediatamente após a etapa de acabamento final, seja a passagem da máquina de acabamento ou a texturização, inicie a cura. O termo "imediatamente" pode ser aberto a interpretações. **A SFA recomenda que a cura seja iniciada dentro de 10 a 15 minutos após a colocação do concreto.** As Figuras 7.11A e 7.11B mostram a cura sendo aplicada imediatamente após a máquina de acabamento. Para informações adicionais sobre a importância da cura imediata, veja o artigo de Praul (2001).

Quando os tabuleiros de pontes são colocados em uma única pista, geralmente é possível aplicar estopa e plástico imediatamente, sem esperar que o concreto endureça para permitir que os trabalhadores caminhem sobre ele. Este tipo de cura é mostrado na Figura 7.11C.



FIGURA 7.11A. Curando o deck da ponte de sílica ativa. A cura é seguir a colocação e o acabamento sem demora.

7.4 ACABAMENTO DE CONVÉS DE PONTE



FIGURA 7.11B. Curando o tabuleiro de ponte de concreto de sílica ativa. Aplicar serapilheira úmida enquanto o concreto ainda estiver muito macio para ser pisado.

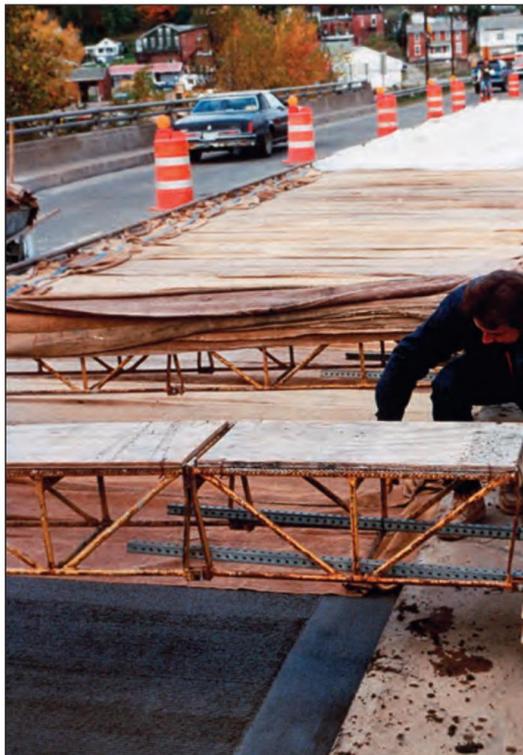


FIGURA 7.11C. Cura úmida usando serapilheira e lâmina de plástico aplicada a um tabuleiro de ponte de concreto de sílica ativa durante a colocação de uma única pista.

7.4 ACABAMENTO DE CONVÉS DE PONTE

Duas perguntas frequentes são:

n Que tipo de cura é necessário? n Por quanto tempo o concreto de sílica ativa deve ser curado?

A SFA recomenda enfaticamente que todos os tabuleiros de pontes de concreto de sílica ativa sejam curados por via úmida. Também recomendamos um mínimo de 7 dias de cura úmida ininterrupta.

Qualquer outro meio de cura ou cura de menor duração pode comprometer a qualidade do concreto. Consulte a Seção 7.6 para discussão adicional sobre a importância da cura de sílica ativa concreto.

7.5

ACABAMENTO DE ESTRUTURAS DE ESTACIONAMENTO E OUTROS PLANOS

Esta seção discute o acabamento do concreto de sílica ativa usado em trabalhos planos, como estruturas de estacionamento. O acabamento de tabuleiros de pontes é abordado na Seção 7.4.

O acabamento do piso de concreto de sílica ativa será a única área em que serão observadas algumas diferenças em relação às práticas regulares. Essas diferenças são o resultado do fato de que o concreto de sílica ativa não sangra. Compreender esta seção ajudará a minimizar quaisquer problemas que possam resultar da falta de sangramento.

O processo de acabamento plano que a SFA recomenda é geralmente chamado de “acabamento em uma passagem”. Às vezes, também é chamado de “acabamento rápido” ou “acabamento da linha de montagem”. O processo geral é baseado em dois conceitos simples - proteja o concreto o tempo todo e não espere que o concreto endureça antes de aplicar a textura final e a cura. O processo de acabamento em uma passagem é mostrado na Figura 7.12. Observe que essa abordagem de acabamento é realmente muito semelhante à usada em tabuleiros de pontes.



FIGURA 7.12. Acabamento em uma passada. O concreto está sendo colocado, nivelado, flutuado, texturizado e curado sem qualquer espera entre as operações.

À primeira vista, as precauções adicionais necessárias para evitar a secagem podem parecer muito problemáticas. Mas a revisão dos parágrafos a seguir mostrará que o acabamento do concreto de sílica ativa, usando os procedimentos de uma passagem, pode realmente ser muito menos trabalhoso e pode ser feito muito mais rapidamente do que o acabamento do concreto convencional.

As etapas típicas de acabamento plano são mostradas no fluxograma da Figura 7.13, que descreve os procedimentos de acabamento convencionais e de uma passagem. Cada uma das etapas do fluxograma é descrita a seguir:

7.5

ACABAMENTO DE ESTRUTURAS DE ESTACIONAMENTO E OUTROS PLANOS

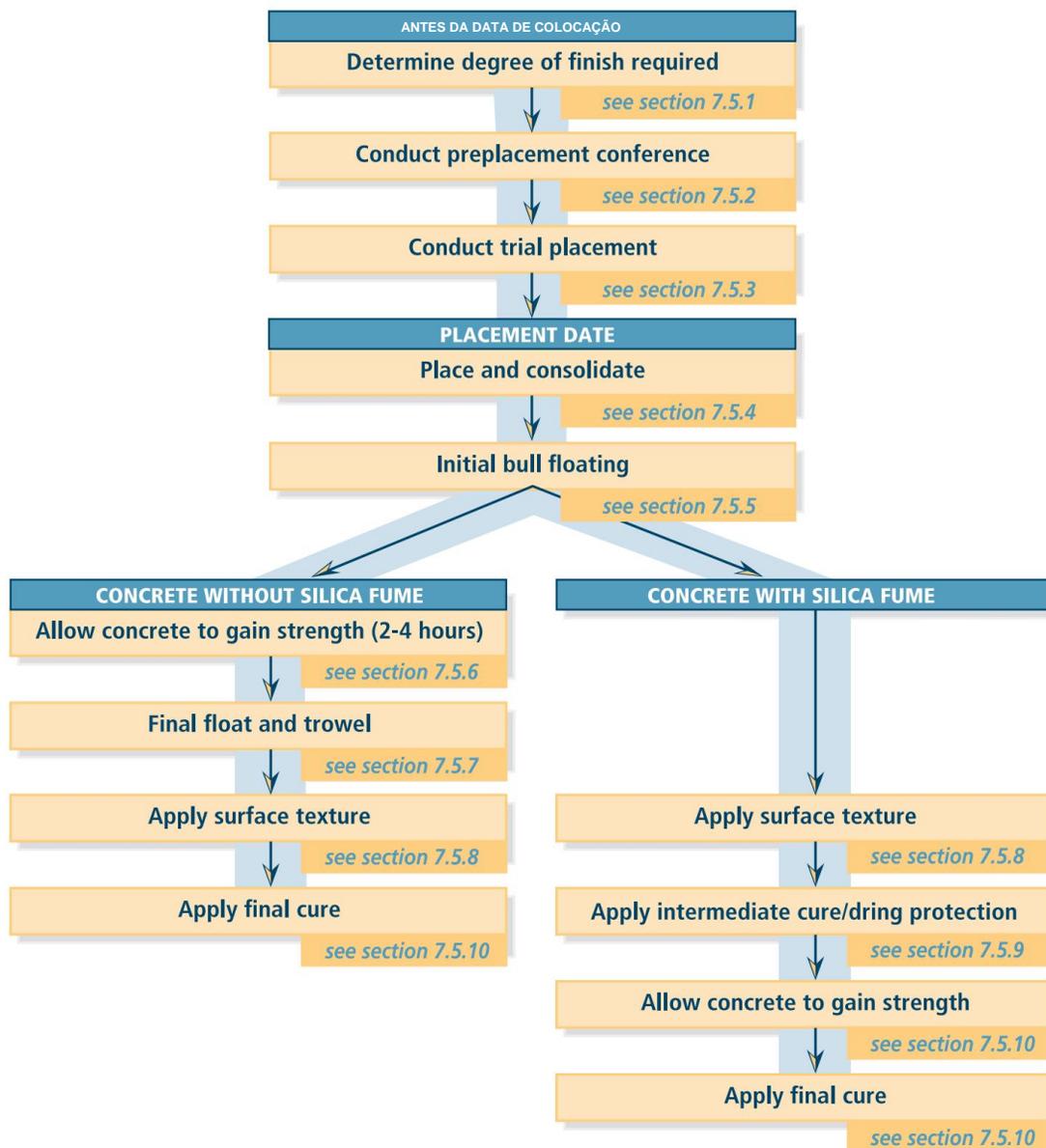


FIGURA 7.13. Etapas de acabamento para planos de concreto com e sem sílica ativa. As etapas são descritas na seção de texto indicada.

7.5

ACABAMENTO DE ESTRUTURAS DE ESTACIONAMENTO E OUTROS PLANOS

7.5.1 Determinar o Grau de Acabamento Necessário

Muito do trabalho plano de concreto tende a ser superacabado porque muitos proprietários passaram a acreditar que o concreto não é adequadamente acabado, a menos que uma espátula elétrica tenha sido usada para produzir uma superfície endurecida. Isso não é necessário para muitas estruturas, particularmente para estruturas de estacionamento, onde o concreto de sílica ativa é frequentemente usado. O grau de acabamento necessário para uma determinada estrutura deve ser determinado em consulta com os especificadores do projeto e o proprietário. Essas informações devem constar nas especificações do projeto. A Silica Fume Association recomenda enfaticamente que um acabamento médio sem desempenadeira mecânica seja a superfície mais adequada para quase todos os trabalhos planos de concreto com sílica ativa. Esta superfície proporcionará excelente tração para pedestres, bem como alta durabilidade para um serviço mais longo.

7.5.2 Realizar uma conferência de pré-colocação

Conforme discutido na Seção 7.1.2, esta reunião é a oportunidade de discutir os planos do empreiteiro para todos os aspectos da obra. Não saia da reunião com perguntas sem resposta.

7.5

ACABAMENTO DE ESTRUTURAS DE ESTACIONAMENTO E OUTROS PLANOS

7.5.3 Conduzir uma colocação de teste

Além disso, conforme discutido na Seção 7.1.2, uma colocação de teste é o momento ideal para finalizar todas as decisões relacionadas à finalização. A colocação experimental deve ser assistida pelo proprietário ou seus representantes que têm autoridade para decidir qual grau de acabamento é aceitável. O empreiteiro deve se comprometer a usar a mesma equipe de acabamento para a colocação experimental e as colocações reais na estrutura. A colocação de teste deve ser grande o suficiente para permitir a demonstração de técnicas realistas de acabamento, conforme mostrado na Figura 7.14. Na conclusão da colocação de teste, uma das duas conclusões deve ser alcançada: uma abordagem de acabamento aceitável foi demonstrada e aceita ou a necessidade de uma colocação de teste adicional foi estabelecida.



FIGURA 7.14. Realização de uma colocação experimental usando o processo de acabamento em uma etapa usando uma laje no solo na estrutura real. Observe que colocar a tela de arame na parte inferior da laje não é uma prática recomendada.

7.5

ACABAMENTO DE ESTRUTURAS DE ESTACIONAMENTO E OUTROS PLANOS

7.5.4 Colocar e Consolidar o Concreto

Conforme discutido anteriormente neste capítulo, essas etapas não são significativamente diferentes dos procedimentos usados para qualquer concreto que não contenha sílica ativa. A Figura 7.15A mostra o concreto sendo nivelado usando uma mesa manual. De longe, o método mais eficaz de consolidar o concreto plano de sílica ativa é usar uma mesa vibratória, conforme mostrado na Figura 7.15B. Essa abordagem deixará uma superfície plana que requer muito pouco trabalho de acabamento adicional. Não se esqueça, no entanto, que seções e vigas mais grossas terão que ser consolidadas usando vibradores internos padrão.



FIGURA 7.15A. Consolidação de concreto de sílica ativa com mesa manual.



FIGURA 7.15B. Consolidação de concreto de sílica ativa usando uma mesa treliçada vibratória.

7.5

ACABAMENTO DE ESTRUTURAS DE ESTACIONAMENTO E OUTROS PLANOS

7.5.5 Executar flutuação inicial de alta

Esta etapa também não é diferente do que é feito para o concreto sem sílica ativa. Os propósitos da flutuação de touro são incorporar quaisquer partículas agregadas na superfície e suavizar quaisquer imperfeições resultantes do processo de alisamento. Consulte a Figura 7.16. Alguns empreiteiros acham que os flutuadores de madeira tendem a rasgar a superfície do concreto de sílica ativa. Eles preferem os flutuadores de aço ou magnésio mais suaves para este concreto.



FIGURA 7.16. Após a pavimentação, a próxima etapa de acabamento é fazer o bote flutuante do concreto. A boia flutuante nivela a superfície e prepara o concreto para receber a textura desejada.

7.5

ACABAMENTO DE ESTRUTURAS DE ESTACIONAMENTO E OUTROS PLANOS

7.5.6 Permitir que o Concreto Termine a Sangria e Ganhe Resistência

Esta etapa é uma parte tradicional do acabamento plano, mas geralmente não é necessária para o concreto de sílica ativa. O sangramento deve terminar antes que a superfície seja fechada para evitar o acúmulo de ar e água, o que pode levar a delaminações. Além disso, o concreto deve desenvolver resistência suficiente para suportar o peso das finalizadoras e equipamentos envolvidos nas próximas etapas de acabamento.

É durante este período de espera que todo concreto, quer contenha sílica ativa ou não, é suscetível a rachaduras e crostas por retração plástica. Se as condições ambientais forem favoráveis à secagem, medidas de proteção devem ser tomadas durante esse período (consulte a Seção 7.3.)

Como o concreto de sílica ativa não sangra, não há razão para esperar para concluir o processo de acabamento, se o proprietário aceitar que não são necessários flutuação adicional e espátula. Aproveitar esta oportunidade para acabamento final imediato pode resultar em economia significativa de mão-de-obra e dinheiro.

7.5.7 Realizar Flutuação Final e alisamento

Esta etapa consiste em pelo menos uma passada sobre o concreto com uma talocha e talvez várias passadas com uma espátula. Para algumas aplicações em que é necessária uma superfície bem fechada e endurecida, essas etapas são essenciais. Para a maioria das aplicações planas de concreto de sílica ativa, a Silica Fume Association não acredita que essas etapas sejam necessárias. (Pode haver pisos de concreto de sílica ativa onde são necessários procedimentos convencionais de flutuação e espátula. Este processo é descrito na Seção 7.8.)

7.5

ACABAMENTO DE ESTRUTURAS DE ESTACIONAMENTO E OUTROS PLANOS

7.5.8 Aplicar textura de superfície

Para concreto sem sílica ativa em uma aplicação como uma estrutura de estacionamento, os finalizadores aplicariam um acabamento de vassoura média após a desempenagem do concreto. O sucesso desta prática é um tanto questionável porque a espátula geralmente aperta a superfície de tal forma que a limpeza será difícil.

Para concreto de sílica ativa, a vassoura deve ser feita logo após a flutuação do touro, conforme o concreto permitir. Normalmente, isso significa esperar alguns minutos enquanto o concreto endurece ligeiramente para que ele mantenha as marcas da vassoura no grau considerado satisfatório. Normalmente, a vassoura será concluída não mais que 15 a 30 minutos após o concreto ser colocado. Consulte as Figuras 7.17A, 7.17B e 7.17C.



FIGURA 7.17A. Dependendo da natureza do acabamento superficial selecionado, pode ser necessário realizar uma passada adicional com float antes da aplicação da textura superficial.

7.5

ACABAMENTO DE ESTRUTURAS DE ESTACIONAMENTO E OUTROS PLANOS



FIGURA 7.17B. Esta foto mostra uma ferramenta de acabamento que é uma combinação de flutuador e vassoura. Em uma direção, serve como um flutuador. Na outra direção, serve de vassoura.



FIGURA 7.17C. Limpeza de uma superfície de concreto de sílica ativa. Nesse caso, a vassoura tem um fio preso a ela para levantá-la da superfície e movimentá-la da direita para a esquerda na foto. A textura é aplicada puxando a vassoura da esquerda para a direita.

7.5

ACABAMENTO DE ESTRUTURAS DE ESTACIONAMENTO E OUTROS PLANOS

7.5.9 Aplicar proteção intermediária de cura/secagem

Concluída a textura da superfície, o concreto ainda mole deve ser protegido da secagem até que ganhe resistência suficiente para resistir à fissuração por retração plástica ou para permitir a aplicação da cura final. Essa proteção pode ser feita usando retardador de evaporação, nebulização ou aplicação de composto de cura. (Figura 7.18A.) Se o composto de cura for usado como a etapa final de cura, ele pode ser aplicado neste momento. Não se esqueça de considerar o que acontecerá nas próximas etapas da construção ao selecionar o método de proteção. Por exemplo, se for usado um composto de cura, pode ser necessário removê-lo antes de pintar as faixas de estacionamento.

7.5.10 Aplicar Cura Final

Há uma grande quantidade de evidências disponíveis que suportam a cura úmida do concreto de sílica ativa. A SFA recomenda enfaticamente que o concreto de sílica ativa seja curado por via úmida. Qualquer abordagem que mantenha a superfície continuamente úmida por pelo menos 7 dias é adequada. A maioria das aplicações usa serapilheira úmida coberta com folhas de plástico ou um produto multifuncional proprietário. **Normalmente, será necessário molhar a serapilheira durante o período de cura para garantir que a água adequada esteja disponível para a hidratação da superfície.** A cura final deve ser iniciada assim que o concreto tiver resistência suficiente para suportar o tráfego de pedestres necessário para colocar os materiais de cura sem danificar a superfície. A cura final é mostrada na Figura 7.19 e é discutida com mais detalhes na Seção 7.6.

7.5

ACABAMENTO DE ESTRUTURAS DE ESTACIONAMENTO E OUTROS PLANOS



FIGURA 7.18. O composto de cura está sendo aplicado ao concreto de sílica ativa em uma estrutura de estacionamento logo após a limpeza. Em muitos casos, o uso de composto de cura é o método de cura preliminar; destina-se a proteger o concreto até que ganhe resistência suficiente para permitir a colocação de materiais de cura úmida no tabuleiro sem danificar a superfície. Neste projeto específico, estopa úmida e folhas de plástico foram usadas para a cura final.



FIGURA 7.19. Serapilheira e folhas de plástico usadas para a cura final. Para a maioria das aplicações de concreto de sílica ativa, a cura úmida fornecerá melhor qualidade do concreto no local do que o uso de um composto de cura sozinho.

7.6 CURA

A cura é provavelmente o elemento mais essencial quando se trata de trabalhar com concreto de sílica ativa. O desempenho esperado, e pelo qual se paga um prêmio, não será alcançado se o concreto não for devidamente curado. Esta seção aborda vários aspectos da cura do concreto de sílica ativa e apresenta as recomendações da SFA para cura.

Existe uma diferença entre a cura de superfícies planas de concreto de sílica ativa e elementos estruturais. Devido à sua grande relação superfície/volume, todo concreto plano, com ou sem sílica ativa, é mais suscetível à secagem e rachaduras por retração. Elementos estruturais, como colunas ou vigas, são menos suscetíveis a esse tipo de fissura. A SFA não tem conhecimento de casos em que rachaduras em membros estruturais tenham sido um problema em um projeto.

7.6.1 Recomendações da associação de sílica ativa

n Recomendamos que a cura seja iniciada dentro de 10 a 15 minutos após a concretagem.

Qualquer atraso no início da cura resultará em uma superfície menos durável.

n Recomendamos fortemente a cura úmida de concreto plano de sílica ativa por um mínimo de sete dias. Nosso raciocínio por trás dessa recomendação é explicado nas seções a seguir.

n Recomendamos proteger as superfícies formadas de elementos estruturais de concreto de sílica ativa usando composto de cura ou outros meios adequados. Depois que os formulários são removidos, recomendamos revestir as superfícies formadas com um composto de cura. Deve-se tomar cuidado para garantir que qualquer composto de cura usado seja removido em áreas onde a colagem posterior é necessária.

7.6 CURA

7.6.2 A cura afeta a durabilidade da superfície

Para tabuleiros de pontes ou outros trabalhos planos, a razão usual para usar sílica ativa ou uma mistura ternária de materiais cimentícios é fornecer um concreto mais durável. Essa durabilidade começa na superfície do concreto, que é a zona mais afetada pela cura. Dado o w/cm tipicamente baixo do concreto usado nessas colocações, água adicional precisa ser fornecida durante o processo de cura para garantir que o concreto da superfície se hidrate totalmente e forneça a durabilidade necessária.

A cura também terá um efeito na resistência do concreto, mas aqui o impacto de uma cura inadequada pode não ser tão perceptível quanto na durabilidade da superfície.

7.6.3 Cura versus Proteção

A proteção do concreto plano de sílica ativa contra a formação de crostas e rachaduras por retração plástica já foi discutida na Seção 7.3. Lembre-se que a proteção é necessária durante e imediatamente após o processo de acabamento até que o processo de cura final seja iniciado. Normalmente, a cura final é aplicada o mais rápido possível. Para tabuleiros de pontes, isso significa que a cura deve começar após a passagem da máquina de acabamento ou após a texturização. Para outros trabalhos planos, a cura deve começar quando o concreto estiver forte o suficiente para permitir que os trabalhadores caminhem sobre ele sem danificar a superfície.

Às vezes há confusão entre proteção contra secagem (ou cura intermediária) e cura final. A Tabela 7.4 resume esses procedimentos.

TABELA 7.4

PROTEÇÃO INTERMEDIÁRIA DE CURA/SECAGEM VERSUS CURA	
CURA INTERMEDIÁRIA/PROTEÇÃO DE SECAGEM	
Curto prazo entre as etapas de acabamento	Longo prazo para ganhar força e durabilidade
Retardadores de evaporação	Cura úmida usando serapilheira e folha de plástico (ou material similar)
Embaçamento	Mínimo de 7 dias
Folhas de plástico	Composto de cura*
Composto de cura*	

*O composto de cura pode ser usado para a etapa de éter. Se o composto de cura for usado para a cura final, ele pode ser aplicado assim que a texturização for concluída.

Independentemente do tipo de colocação, não deve haver um período de exposição em que a superfície do concreto de sílica ativa seque.

7.6 CURA

7.6.4 Cura e Rachadura

Muito já foi escrito sobre a tendência do concreto de sílica ativa a rachar. Um fato parece consistente: não há nada inerente ao concreto de sílica ativa que o faça rachar.

O que parece ser crítico é a cura do concreto. Seguir as recomendações de proteção e cura deste manual ajudará a minimizar a possibilidade de rachaduras.

Aqui estão duas descobertas importantes sobre cura e rachaduras.

- n Whiting e Detwiler (1998), em um estudo para o National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), concluíram que os concretos de sílica ativa tendem a rachar apenas quando são curados com umidade insuficiente. Além disso, eles descobriram que, se as misturas de concreto de sílica ativa receberem sete dias de cura úmida contínua, não há associação entre o conteúdo de sílica ativa e a fissuração.
- n O DOT do estado de Nova York relatou conclusões semelhantes para sua mistura de deck de ponte de concreto de alto desempenho, que contém cimento portland, cinzas volantes e sílica ativa. Depois de inspecionar 84 tabuleiros de pontes com esta mistura de concreto, eles relataram: "Os resultados indicaram que os tabuleiros da Classe HP tiveram um desempenho melhor do que o concreto especificado anteriormente em resistir a fissuras longitudinais e transversais". (Alampali e Owens 2000) NYSDOT especifica sete dias de cura úmida para esta mistura.

7.6.5 Proteção de inverno

Neste aspecto, o concreto de sílica ativa não é diferente do concreto sem sílica ativa. Se o concreto sem sílica ativa exigir proteção, o concreto com sílica ativa deve ser protegido nas mesmas condições. Consulte ACI 306R, *Concretagem em climas frios*, para uma discussão sobre a concretagem em climas frios.

7.7 CONCRETO PRÉ-MOLDADO

O concreto de sílica ativa tem sido usado com sucesso em uma ampla variedade de aplicações pré-moldadas. Em geral, não há diferença entre o uso de sílica ativa em concreto pré-moldado ou em concreto pré-fabricado. No entanto, uma questão merece atenção.

Normalmente, na produção de concreto pré-moldado, onde a cura a temperatura elevada é aplicada, há um período predefinido antes que a temperatura seja aumentada. Este período permite que as reações iniciais de hidratação comecem para que o concreto tenha resistência suficiente para tolerar a temperatura mais alta. Durante o período predefinido, a superfície do concreto de sílica ativa deve ser protegida contra secagem para evitar rachaduras por retração plástica. Não deixe simplesmente a superfície de concreto exposta a condições de secagem durante este período. Qualquer um dos métodos de proteção descritos anteriormente pode ser aplicado.

7.8 PREOCUPAÇÕES DIVERSAS

Esta seção aborda várias outras questões relacionadas à colocação, acabamento e cura do concreto de sílica ativa.

7.8.1 Corte de Juntas

Não se esqueça que o concreto plano de sílica ativa geralmente ganha resistência muito mais rapidamente do que o concreto sem sílica ativa. Revise o tempo de corte da junta para garantir que não passe muito tempo antes que as juntas sejam cortadas. Corte as juntas o mais rápido possível para evitar rachaduras. Retorne a cura úmida após cortar as juntas.

7.8.2 Protensão de Cordoalhas Pós-tensionadas

Tensione os fios PT quando o concreto tiver desenvolvido resistência adequada, não no final de um período arbitrário como 3 dias. O concreto com sílica ativa ganhará resistência rapidamente e estará pronto para sofrer tensões mais cedo do que o concreto sem sílica ativa. Estamos cientes de casos em que a tensão foi atrasada, resultando em trincas que poderiam ter sido evitadas.

7.8.3 Pisos Pavimentos Duros

Em alguns casos, o processo de acabamento de uma passagem com uma superfície escovada ou estanhada não será aceitável para a aplicação específica. Por exemplo, uma instalação de processamento de alimentos exigirá um piso com espátula para uma limpeza adequada. O concreto de sílica ativa pode ser desempenado com colher de pedreiro para produzir superfícies excelentes. Para realizar este tipo de acabamento, tome as devidas providências para evitar que o concreto resseque durante o período de espera para aplicação das máquinas de acabamento no concreto. Essas etapas são exatamente as mesmas discutidas anteriormente para proteger o trabalho plano em tabuleiros de pontes ou estruturas de estacionamento. Apenas lembre-se - nunca deixe a superfície de concreto secar enquanto espera para voltar a ela.

Uma superfície dura não é recomendada para concreto com ar incorporado. Tem havido muitos relatos de delaminações superficiais causadas pela desempenagem do concreto antes que todo o sangramento tenha terminado. A ACI 301, *Especificações para Concreto Estrutural*, limita o conteúdo máximo de ar a três por cento para espátula dura. Como um concreto de sílica ativa normalmente não sangra, isso se torna uma situação muito complicada em que uma colocação de teste seria benéfica.

7.8 PREOCUPAÇÕES DIVERSAS

7.8.4 Pintura Após a Cura

Tem havido problemas na aplicação de faixas de tráfego em concreto de sílica ativa que foi curado com compostos de cura. Este problema provavelmente está mais relacionado ao composto de cura do que à sílica ativa. Ao usar um composto de cura, verifique se o material de cura e a tinta são compatíveis ou será necessário remover o composto antes de pintar.

8

SÍLICA FUME E SUSTENTABILIDADE

O uso de sílica ativa no concreto pode fornecer contribuições significativas para a sustentabilidade ao usar o concreto como material de construção. Este capítulo analisa os

vários modos de contribuição

da sílica ativa para melhorar a sustentabilidade do uso do concreto.

8.1 Pegada de carbono (CO₂) da sílica ativa	163
8.2 Componentes Minerais Recuperados (RMC)....	164
8.3 Vida Útil Prolongada	165
8.4 Características de Engenharia Melhoradas.....	166
8.5 Concreto de Baixo Carbono	167

8.1 PEGADA DE CARBONO (CO₂) DE SÍLICA FUME

Conforme descrito no Capítulo 1, a sílica ativa é um subproduto inevitável da produção de silício metálico ou ligas de ferrosilício, e a fumaça particulada foi originalmente considerada um resíduo. Análises e testes estabeleceram o potencial pozolânico do material. Muito pouca energia é gasta para coletar e processar a sílica ativa em sua forma de produto final e, portanto, a sílica ativa tem uma pegada de CO₂ muito baixa. Vários valores de pegada de CO₂ foram usados para a sílica ativa, variando entre 10 e 20 kg/tonelada métrica, que é aproximadamente apenas 1,5 por cento do cimento portland.

A contribuição de CO₂ da sílica ativa para o concreto é insignificante, normalmente na faixa de 1-2 kg/m³ de concreto, o que é inferior a 0,5 por cento da pegada de CO₂ combinada dos convencionais concreto.

Uma pergunta frequente é se existe uma Declaração Ambiental de Produto (EPD) para sílica ativa como existe para outros ingredientes de concreto. A resposta é não. A razão é que o EPD genérico preparado pelo NRMCA (2019) para concreto trata a sílica ativa como não contribuindo com a pegada de CO₂ para o concreto. Portanto, um EPD para sílica ativa não é necessário.

8.2 COMPONENTES MINERAIS RECUPERADOS (RMC)

Os RMC identificados pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA 2008) são cinzas volantes, cimento de escória e sílica ativa, que são vistos como “substitutos” do cimento portland, com base em quilograma por quilo. Na Tabela 8.1, os três RMC identificados são comparados quanto à sua eficiência em produzir resistência à compressão semelhante aos 28 e 56 dias. Conforme mostrado na Tabela 8.1, um quilo de sílica ativa pode substituir aproximadamente três a quatro quilos de cimento Portland e atingir resistência à compressão semelhante. Na prática, o uso exclusivo de sílica ativa para substituir o cimento portland – com base na mesma resistência – não é feito. Isso pode resultar em volumes de pasta muito baixos, o que pode dar resistência, mas pouca durabilidade. Em vez disso, a sílica ativa é usada como uma adição, geralmente em combinação com cinzas volantes ou cimento de escória, para fornecer propriedades de concreto melhoradas específicas, como maior resistência, maior vida útil da estrutura, menor calor ou outras propriedades de concreto aprimoradas.

A eficácia da sílica ativa como adição ao cimento portland é mais pronunciada quando se trata de durabilidade do concreto, porque ao contrário do outro RMC, ela tem um tamanho de partícula aproximadamente 100 vezes mais fino que o cimento portland. Isso é particularmente útil no empacotamento de partículas. Consulte a Seção 5.7.1 para discussão do empacotamento de partículas. O efeito do empacotamento de partículas é fundamental para diminuir a permeabilidade do concreto, que por sua vez aumenta a durabilidade do concreto, simplesmente restringindo o acesso de substâncias deletérias abaixo da superfície que podem causar deterioração acelerada.

TABELA 8.1

EFICIÊNCIA DE SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND DE COMPONENTES MINERAIS RECUPERADOS			
RMC (Classe F/Grau 100/densificado)	CINZAS VOLANTES	ESCÓRIA DE CIMENTO	SÍLICA FUME
Faixas de substituição habituais (por peso de cimento) prática de campo real	20–30 por cento	30–50 por cento	5–15 por cento na
Intervalos médios de substituição	70kg/m ³	150 kg/m ³	30 kg/m ³
Porcentagem de eficiência RMC: fator de substituição de peso (lb-RMC/lb-OPC) para resistência à compressão semelhante de 28 dias	65% 1,54:1	90% 1,11:1	300% 0,33:1
Porcentagem de eficiência RMC: fator de substituição de peso (lb-RMC/lb-OPC) para resistência à compressão semelhante de 56 dias	83% 1,20:1	100% 1,00:1	400% 0,25:1

Dados de Bühler 2012.

8.3 VIDA ÚTIL ESTENDIDA

Como a sílica ativa torna as estruturas mais duráveis, uma vida útil mais longa será alcançada. Se uma estrutura precisa ser reparada ou substituída com menos frequência, isso não é apenas uma vantagem econômica óbvia, mas também maximiza o ciclo de vida dos materiais de construção empregados. Se uma estrutura de concreto pode durar o dobro do tempo, basicamente a pegada de CO₂ da construção foi cortada pela metade.

Especificar e prever a vida útil de estruturas como pontes ou estruturas de estacionamento está sendo feito com mais frequência. O aspecto mais crítico da vida útil de muitas estruturas é a resistência à corrosão causada pela intrusão de íons cloreto no concreto. Embora o ACI 318 forneça requisitos para proteção contra corrosão, ele não inclui requisitos para vida útil. No entanto, os proprietários estão exigindo estruturas com uma vida útil mais longa, e especificações de ciclo de vida de 50 a 100 anos para infraestrutura crítica estão se tornando mais comuns.

Um meio de observar a vida útil estendida é usar um modelo que preveja a taxa na qual os íons de cloreto atingirão o nível do reforço em uma estrutura de concreto. Life-365 é um modelo que permite a entrada de várias combinações de materiais de concreto e condições de exposição para fazer previsões de vida útil. O Life-365 foi desenvolvido no início dos anos 90.

Ele foi posteriormente atualizado e está disponível para download (www.silicafume.org).

No Capítulo 5, a Tabela 5.4 mostra diversas misturas de concreto que foram avaliadas pela Administração Ferroviária Federal. Os dados apresentados incluem a vida útil prevista das várias misturas de concreto usando o Life-365. Os dados mostram as relações entre a vida útil estimada, as propriedades mecânicas e a pegada de CO₂.

8.4 CARACTERÍSTICAS DE ENGENHARIA MELHORADAS

A sílica ativa pode melhorar várias propriedades projetadas no concreto, como resistência à compressão e à flexão, módulo de elasticidade e resistência à abrasão e ao impacto. Todas essas características de desempenho acabam beneficiando a sustentabilidade, estendendo o ciclo de vida do concreto ou produzindo uma estrutura de concreto mais resiliente, especialmente em ambientes adversos.

Originalmente, a sílica ativa era sinônimo de concreto de alta resistência, mas muitas outras vantagens surgiram. Por exemplo, usar substituições maiores de cinzas volantes ou cimento de escória pode reduzir a resistência inicial do concreto. Ao preparar uma mistura ternária de cimento portland, cinzas volantes ou cimento de escória e uma pequena quantidade de sílica ativa, a diferença de resistência à compressão de idade precoce pode ser reduzida ou eliminada. Consulte o Capítulo 3 (Seção 3.3) para exemplos de projetos de uso de vários materiais cimentícios.

O uso de concreto de sílica ativa de alta resistência para colunas e vigas permite uma redução no tamanho do membro, ou aumento no espaçamento, ou ambos, o que, por sua vez, resulta em uma redução no volume geral do concreto. O resultado líquido é uma estrutura mais sustentável e funcional para o proprietário, bem como uma menor utilização de fontes não renováveis. Consulte o Capítulo 3 (Seção 3.2.1.1) para obter descrições sobre o uso de concreto de sílica ativa de alta resistência.

8.5 CONCRETO DE BAIXO CARBONO

O termo “concreto de baixo carbono” é frequentemente visto, no entanto, não há uma definição amplamente aceita para esse termo. A sustentabilidade na indústria do concreto é, portanto, focada no conceito de que o cimento portland contribui com cerca de 90% da pegada de carbono do concreto. Assim, a redução do teor de cimento portland no concreto torna-se o foco principal.

Lembre-se de que o concreto deve primeiro atender aos requisitos de desempenho - fresco e endurecido - a pegada de carbono derivará da qualidade desse concreto, e não o contrário. É necessário considerar várias ações que também contribuirão para a redução total da pegada de carbono de um concreto, visto no contexto da construção completa:

1. Use uma mistura ideal de componentes cimentícios, reduzindo a pegada de CO₂, mas ainda produzindo um concreto que cumpre as propriedades frescas e endurecidas necessárias.
2. Use um concreto de maior resistência para reduzir a quantidade total de concreto.
3. Aumentar a durabilidade do concreto, aumentando a resiliência estrutural, levando a uma vida útil muito maior ciclo.

A combinação dessas três ações de design sustentável pode potencialmente reduzir a pegada de CO₂ por um fator de até 10 vezes. A Tabela 8.2 mostra três exemplos de misturas convencionais de concreto de 28 MPa, variando de teor de cimento portland puro a versões alternativas de substituição de RMC, em comparação com três exemplos de projetos de concreto reais utilizando misturas de concreto de alto desempenho incorporando teores totais de materiais cimentícios mais altos.

Maiores eficiências de sustentabilidade em favor do concreto de alto desempenho podem ser prontamente previstas. O volume de concreto reduzido se traduziria em eficiências de transporte. Fatores de alta trabalhabilidade típicos em concreto de alto desempenho resultarão em métodos de colocação de energia mais rápidos e mais baixos, desgaste em máquinas e assim por diante.

8.5 CONCRETO DE BAIXO CARBONO

TABELA 8.2

COMPARAÇÃO DA PEGADA DE CO ₂ DE CONCRETO CONVENCIONAL VERSUS DE ALTO DESEMPENHO							
mistura de concreto	cimentício materiais, contribuição de resistência, estimativa de contribuição para contribuição de cimento 28 dias, por 6,8 MPa kg/m ³ <i>nota de rodapé 1</i>	CO ₂ iniciação de por ano de rodapé 2	Compressivo ano de rodapé 2	CO ₂ ano de rodapé 2	Vida-365 para contribuição de cimento 28 dias, por 6,8 MPa, kg/m ³ vida útil kg	CO ₂ para contribuição de cimento 28 dias, por 6,8 MPa, kg/m ³ vida útil kg	CO ₂ para contribuição de cimento 28 dias, por 6,8 MPa, kg/m ³ vida útil kg
Convencional 28 MPa	PC: 297 w/cm: 0,50	284	31	64	10	28.4	Média 4,48
Alternativa 1, substituição de 30 por cento de cinzas volantes	PC: 231 FA(F): 101 w/cm: 0,50	231	31	52	12	19.3	
Alternativa 2, substituição de 50 por cento de cimento de escória	PC: 157 SC: 157 w/cm: 0,50	175	31	52	12	19.3	
arranha- céus de Miami estrutura	PC: 267 SC: 267 SF: 30 w/cm: 0,29	299	81	26	62	4.8	Média 0,42
Instalação de armazenamento de cilindros nucleares (consulte a Seção 5.3)	PC: 232 FA(F): 89 SF: 36 w/cm: 0,37	231	43	38	62	3.7	
Piso, estação de transferência de resíduos	PC: 343 FA(F): 75 SF: 84 w/cm: 0,34	338	71	33	100+	3.4	

Nota de rodapé 1. Notação utilizada: PC, cimento portland; FA (F), cinza volante classe F; SC, cimento de escória, grau 100; SF, sílica ativa.

Nota de rodapé 2. A pegada de carbono de CO₂ em quilogramas por tonelada métrica de material foi assumida usando os seguintes valores da indústria: cimento Portland – 959 kg, cimento de escória – 155 kg, cinza volante, classe F – 93 kg e sílica ativa – 14 kg.

Nota de rodapé 3. A exposição ao Life-365 foi a mesma para todas as misturas mostradas na tabela. A estimativa do tempo de corrosão é uma média de uma estrutura de estacionamento ao norte e uma exposição ao oceano ao sul. A tampa em ambos os casos é de 38 mm.

Dados de Bühler 2012.

9

PROBLEMAS DE SAÚDE DE SÍLICA FUME

Por ser uma forma amorfa de sílica, a sílica ativa não está associado a condições de saúde severas como a silicose. No entanto, como acontece com qualquer material empoeirado, certas precauções são apropriadas.

Este capítulo aborda as precauções de saúde para trabalhar com sílica ativa e concreto de sílica ativa.

Uma folha de dados de segurança de sílica ativa (SDS) típica e uma etiqueta de advertência na bolsa também são explicadas.

9.1 Considerações Gerais e Recomendações	170
9.2 Ficha de Dados de Segurança de Fumo de Sílica.....	172
9.3 Etiqueta de advertência do saco de sílica fumegante	173

9.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES

Por causa do nome “sílica ativa”, frequentemente surgem dúvidas sobre questões de saúde relacionadas ao uso desse material no concreto. A preocupação geral é com a silicose, amplamente divulgada na indústria da construção. Como a sílica ativa é amorfa e não cristalina, a silicose não é um problema. Este capítulo examina as questões de saúde associadas ao uso de sílica ativa no concreto e faz as recomendações apropriadas.

A sílica ativa foi exaustivamente testada e avaliada. Como resultado desta avaliação de risco, a sílica ativa não atende a nenhum dos critérios de classificação do Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos (UN-GHS) como perigo físico, de saúde ou ambiental. No geral, os aspectos relacionados à saúde da sílica ativa podem ser resumidos da seguinte forma:

- n A sílica ativa é essencialmente um material não perigoso. Ele se enquadra na categoria geral de poeira incômoda, que é semelhante ao cimento portland e muitos outros pós finos.
- n Deve-se tomar cuidado em todas as operações envolvendo sílica ativa antes de colocá-la no concreto para evitar a criação de poeira.
- n Uma máscara contra poeira ou respirador apropriado deve ser usado ao manusear sílica ativa seca antes de ser adicionado ao concreto. O equipamento de proteção individual deve ser selecionado para atender às condições de exposição e ambientais especificadas pela legislação local. Exemplos de equipamentos são mostrados nas Figuras 9.1A e 9.1B.
- n O SFA não tem conhecimento de nenhum caso em que um trabalhador exposto à sílica ativa em qualquer fase da operações de concreto foi diagnosticado com qualquer doença atribuída ao uso de sílica ativa no concreto.

9.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES



FIGURA 9.1A. Máscara contra poeira recomendada para uso ao trabalhar com sílica ativa seca antes de ser misturada ao concreto em um local aberto e externo. (Esta é a máscara N95 que foi usada como proteção durante a pandemia de COVID.) A seleção de uma máscara ou respirador deve ser feita com base na exposição e nas condições ambientais. Consulte o seguinte site para obter orientações sobre como selecionar uma máscara ou respirador apropriado: <https://www.cdc.gov/niosh/ppe/>



FIGURA 9.1B. Respirador adequado para trabalhar em locais onde se espera que as concentrações de poeira sejam maiores do que as adequadas para o uso da máscara mostrada na Figura 9.1A.

9.2 FICHA DE DADOS DE SEGURANÇA DE SÍLICA FUME

Uma Ficha de Dados de Segurança (SDS) para sílica ativa é apresentada no Apêndice 2. Este formulário é para o material de um fabricante, mas o formulário segue o formato padrão para tais informações. O aspecto mais significativo do SDS é a referência ao dióxido de silício cristalino. De acordo com a lei da Califórnia, qualquer quantidade de dióxido de silício cristalino deve ser informada no SDS. Este fabricante específico optou por usar um único SDS para todos os seus materiais, portanto, o aviso da Califórnia aparecerá em todos os locais.

Observe também a advertência quanto ao ressecamento da pele ao entrar em contato com sílica ativa seca. Este é um efeito físico resultante da grande área de superfície da sílica ativa.

9.3 ETIQUETA DE ADVERTÊNCIA DO SACO DE SÍLICA FUME

Etiquetas de advertência típicas de sílica ativa ensacada são mostradas na Figura 9.2. Os avisos gerais na bolsa são retirados diretamente do SDS. O diamante de perigo à direita da etiqueta de advertência está no formato definido pela National Fire Protection Association (NFPA). O “1” no quadrante da saúde indica que o material “pode ser irritante”.

9.3 ETIQUETA DE ADVERTÊNCIA DO SACO DE SÍLICA FUME

A SÍLICA FUME É GERALMENTE CONSIDERADA UM PÓ INCOMODANTE. O USO E MANUSEIO DA SÍLICA FUME NÃO REPRESENTA RISCO À SAÚDE QUANDO AS NORMAS NORMAIS DE SEGURANÇA FOREM OBSERVADAS.

INSTRUÇÕES DE SEGURANÇA LEIA ANTES DE USAR

PARA INFORMAÇÕES ADICIONAIS, CONSULTE A SDS

COMPOSIÇÃO – INGREDIENTES

- Sílica Fumegante, Dióxido de Silício Número CAS 69012-64-2
- Nº EINECS: 273-761-1
- A inalação pode causar irritação respiratória resultando em tosse, espirro e/ou outros sintomas incômodos •
- O contato com os olhos pode causar irritação
- O uso prolongado ou repetido pode causar irritação ou ressecamento da pele

MEDIDAS DE PRECAUÇÃO: • Prevenir

- as emissões atmosféricas e evitar a formação de poeira.
- Equipe misturadores e tremonhas com tampas contra poeira. • Forneça ventilação se o local de trabalho garantir que o respirador OSHA 29CFR 1910.134 deve ser seguido. Consulte NIOSH 42 CFR 84 para respiradores aprovados quando as concentrações no ar forem iguais ou superiores aos Limites de exposição permitidos.
- Use óculos de segurança bem ajustados quando uma avaliação de risco indicar que isso é necessário. •
- Escolher proteção corporal de acordo com a tarefa a ser executada e os riscos envolvidos e deve ser aprovado por um especialista. Luvas resistentes a produtos químicos devem ser sempre usadas ao manusear produtos químicos.

PRIMEIRO SOCORRO:

- Olho:** Lave os olhos com água e enxágue cuidadosamente sob as pálpebras. Se necessário, procure atendimento médico.
- Pele:** Lave a pele com água e sabão neutro.
- Inalação:** Se inalado em excesso, remova a pessoa exposta para o ar fresco. Se necessário, procure atendimento médico.
- Ingestão:** Obtenha os primeiros socorros ou assistência médica imediatamente.

LIBERAÇÃO E DESCARTE ACIDENTAL:

- Se o produto for derramado, observe as precauções acima. Colete usando métodos que minimizem a criação de poeira no ar. A limpeza a vácuo de alta eficiência é recomendada para recuperar o material derramado. Coloque em recipiente adequado para reciclagem ou descarte. Descarte os resíduos de acordo com os regulamentos federais, estaduais e locais.

NÚMERO TELEFÔNICO DE EMERGÊNCIA:

Chemtec 800-424-9300

HEALTH	0
FLAMMABILITY	0
REACTIVITY	0
SPECIAL	-



FICHA DE DADOS DE SEGURANÇA DISPONÍVEL

APENAS PARA USO INDUSTRIAL
MANTENHA FORA DO ALCANCE DE CRIANÇAS

FIGURA 9.2. Etiqueta de advertência de sílica ativa ensacada de acordo com a prática dos EUA. As etiquetas de advertência em outros locais podem ser diferentes.

10 REFERÊNCIAS

Este capítulo inclui todas as referências citadas no documento.

10.1 Instituto Americano do Concreto (ACI).....	175
10.2 ASTM Internacional.....	176
10.3 Associação Americana de Rodovias Estaduais e Funcionários de Transporte (AASHTO).....	177
10.4 Comitê Europeu para Normalização (CEN)	178
10.5 Referências Citadas.....	179

10.1 AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI)

ACI Concreto Terminologia.

ACI 211.1, Prática Padrão para Seleção de Proporções para Concreto Normal, Pesado e Massa.

ACI 211.6T, Método de Dosagem de Mistura de Suspensão Agregada.

ACI 234R, Guia para Uso de Sílica Fume em Concreto.

ACI 301, Especificações para Concreto Estrutural.

ACI 304.2R, Colocação de Concreto por Métodos de Bombeamento.

ACI 306R, Concretagem em Clima Frio.

ACI 308R, Guia de Cura do Concreto.

ACI 309R, Guia para Consolidação do Concreto.

ACI 318, Requisitos do Código de Construção para Concreto Estrutural.

ACI 546.1R, Guia para Reparos de Superestruturas de Pontes de Concreto.

Disponível a partir de:

Instituto Americano do Concreto

Post Office Box 9094

Farmington Hills, Michigan 48333 www.concrete.org

10.2 ASTM INTERNACIONAL

ASTM C94, *Especificação Padrão para Concreto Pronto.*

ASTM C192, *prática padrão para fabricação e cura de amostras de teste de concreto no laboratório.*

ASTM C618, *Especificação padrão para cinza volante de carvão e pozolana natural bruta ou calcinada para uso em concreto.*

ASTM C779, *Método de teste padrão para resistência à abrasão de superfícies horizontais de concreto.*

ASTM C989, *Especificação padrão para cimento de escória para uso em concreto e argamassas.*

ASTM C1138, *Método de Teste Padrão para Resistência à Abrasão do Concreto (Método Subaquático).*

ASTM C1202, *Método de teste padrão para indicação elétrica da capacidade do concreto de resistir à penetração de íons de cloreto.*

ASTM C1240, *Especificação padrão para sílica ativa usada em misturas de cimento.*

ASTM C1611, *Método de teste padrão para fluxo de queda de concreto autoadensável.*

ASTM C1778, *Guia Padrão para Redução do Risco de Reação Deletéria de Álcali-Agregado em Concreto.*

ASTM C1856, *prática padrão para fabricação e teste de amostras de concreto de ultra-alto desempenho.*

ASTM E965, *método de teste padrão para medir a profundidade da macrotextura do pavimento usando técnicas volumétricas.*

Disponível em:

ASTM International 100

Barr Harbor Drive West

Conshohocken, Pennsylvania 19428 www.astm.org

10.3 ASSOCIAÇÃO AMERICANA DE RODOVIAS ESTADUAL E OFICIAIS DE TRANSPORTE (AASHTO)

AASHTO M 307-13, *Especificação padrão para uso de sílica ativa como uma mistura mineral em argamassa e argamassa de concreto hidráulico-cimento.*

AASHTO, 2017, *LFRD Bridge Construction Specifications*, Quarta Edição, 564 pp.

AASHTO, 2020, *LFRD Bridge Design Specifications*, Nona Edição, 1920 pp.

Disponível em:

American Association of State Highway and Transportation Officials 444 N Capitol

Street, NW

Suíte 249

Washington, DC 20001 <http://>

www.transportation.org

10.4 COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO (CEN)

EN13263-1, *Sílica ativa para concreto – Parte 1: Definições, requisitos e critérios de conformidade.*

Disponível em:

European Committee for Standardization Rue de la
Science 23 B-1040 Bruxelas,

Bélgica Tel: +32 2

550 08 37 <https://>

standards.cen.eu

Observe que cada país europeu que está usando os Padrões CEN pode publicar sua própria versão – portanto, NS EN 13263 para a Noruega; BS EN 13263 para o Reino Unido, etc. O CEN é o local singular para a especificação genérica.

10.5 REFERÊNCIAS CITADAS

- Alampalli, S., e Owens, F., 2000, "In-Service Performance of High-Performance Concrete Bridge Decks," *Fifth International Bridge Engineering Conference*, Transportation Research Record 1696, Volume 2, Transportation Research Board, Washington, DC, pp 193-196.
- Bickley, JA, Ryell, J., Rogers, C., e Hooton, RD, 1991, "Algumas características do concreto estrutural de alta resistência," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 18, nº 5, outubro, pp. 889.
- Bühler, E., 2012, "Projeto de Concreto Verde Incorporando Avaliação do Ciclo de Vida e Previsão da Vida Útil e o Efeito de Reduzir a Pegada de Carbono com Concreto de Alto Desempenho." *Anais da Conferência Internacional de Sustentabilidade do Concreto NRMCA*, Seattle.
Disponível em <https://www.norchem.com/technical-papers-articles.html>
- Burg, RG e Ost, BW, 1994, *Propriedades de Engenharia de Concreto de Alta Resistência Comercialmente Disponível (Incluindo Dados de Três Anos)*, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento RD104T, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 58 pp.
- El-Tawil, Sherif, Tai, Yuh-Shiou, Belcher, II John A., e Rogers, Dewayne, 2020, "Open-Recipe Ultra-High-Performance Concrete," *Concrete International*, Vol . 42, No.6, pp. 33-38.
- EPA, 2008, *Relatório ao Congresso EPA 530-R-08-007*, Capítulo 12: Visão geral da indústria e níveis atuais de substituição de RMC (componente mineral recuperado), 88 pp.
- Federal Highway Administration, 2019, *Projeto e Construção de Conexões UHPC Field-Cast*, FHWA-HRT-19-011, Washington, DC. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infraestrutura/structures/bridge/uhpc/19011/19011.pdf>
- Federal Highway Administration, 2022, *Projeto e construção de soluções de preservação e reparo de pontes baseadas em UHPC*, FHWA-HRT-22-065, Washington, DC. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/22065/22065.pdf>
- Forrest, MP, Morgan, DR, Obermeyer, JR, Parker, PL e LaMoreaux, DD, 1995, "Retrofit sísmico da barragem de Littlerock," *Concrete International*, vol. 17, nº 11, novembro, pp. 30-36.
- Holland, TC, 1998, "High-Performance Concrete: As High as It Gets", *The Concrete Producer*, V. 16, nº 7, julho, pp. 501-505.
- Holland, TC, Krysa, A., Luther, M., e Liu, T., 1986, "Use of Silica-Fume Concrete to Repair Abrasion-Erosion Damage in the Kinzua Dam Stilling Basin," Proceedings, CANMET/ACI *Second International Conferência sobre o uso de cinzas volantes, sílica ativa, escórias e pozolanas naturais em concreto*, Madri, SP-91, vol. 2, American Concrete Institute, Detroit, pp. 841-864.
- Hooton, RD, Pun, P., Kojundic, T., Fidjestøl, P., "Influence of Silica Fume on Chloride Resistance of Concrete," Proceedings, PCI/FHWA International Symposium on *High Performance Concrete*, New Orleans, outubro de 1997, pp 245-256.

10.5 REFERÊNCIAS CITADAS

Kosmatka, Steven H., e Wilson, Michelle L., 2016, Design and Control of Concrete Mixtures, 16ª Edição, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 615 pp.

Leonard, Mark A., 1999, "I-25 Over Yale Avenue — the Thin Solution," *HPC Bridge Views*, No. 3, maio-junho, p. 2.

Luciano. John J., Nmai, Charles, K., e DelGado, James, R. 1991, "Uma nova abordagem para o desenvolvimento de concreto de alta resistência", *Concrete International*, vol. 13, nº 5, pp. 25-29.

Luciano, João. J., e Bobrowski, GS, 1990, "Usando métodos estatísticos para otimizar o desempenho do concreto de alta resistência," *Cimento, aditivos e concreto*, Registro de pesquisa de transporte 1284, Conselho de pesquisa de transporte, Washington, DC, pp. 60-69.

Miller, RA, 1999, "From Three Spans to One with HPC," *HPC Bridge Views*, No. 4, julho-agosto, p. 5.

NRMCA, 2015, *Manual do motorista da betoneira*, sexta edição, publicação NRMCA nº 118, Associação Nacional de Concreto Misturado Pronto, Silver Spring, MD.

NRMCA, 2019, *NRMCA Member Industry-Average EPD for Ready Mixed Concrete*, National Ready Mixed Concrete Association, Alexandria, VA, 34 páginas. Disponível em: <https://www.nrmca.org/association-resources/sustainability/environmental-product-declarations/>

Praul, Michael F., 2001, "Cura para decks de pontes HPC – Traga a água!", *Vistas de pontes HPC*, nº 4, julho-agosto, pp. 2-3.

Smith, Gregory J. e Rad, Franz N., 1989, "Vantagens econômicas de concretos de alta resistência em colunas", *Concrete International*, vol. 11, nº 4, pp. 37-43.

Nações Unidas, 2021, *Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos (GHS)*, Nona Edição, 556 pp. Disponível em: <https://unece.org/transport/standards/transport/>

Waszczuk, C., 1999, "Deck de ponte HPC sem rachaduras – experiência de New Hampshire", *HPC Bridge Views*, nº 4, julho-agosto, pp. 2-3.

Whiting, D., e Detwiler, R., 1988, "Silica-Fume Concrete for Bridge Decks," *Report 410*, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, DC, 107 pp.

Xi, Yunping, Shing, Benson, Abu-Hejleh, Naser, Asiz, Andi, Suwito, a., Xie, Zhaohui e Ababneh, Ayman, 2003, Avaliação do Problema de Rachaduras em Plataformas de Pontes Recentemente Construídas no Colorado, Colorado Department of Relatório de Transporte CDOT-DTD-R-2003-3, Denver, Colorado, 136 pp.

APÊNDICE 1

EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO EM UNIDADES POLEGADAS-LIBRA

A.1 Exemplos de proporção em unidades de polegada-libra	182
A.1 Exemplo 1 – Plataforma da ponte	182
A.2 Exemplo 2 – Estrutura de estacionamento moldada no local	185
A.3 Exemplo 3 – Colunas de Concreto de Alta Resistência	188

A.1 EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO EM UNIDADES POLEGADAS-LIBRA

A seguir estão três exemplos do procedimento de dosagem de mistura passo a passo. A Tabela A.1, seguindo os exemplos, mostra as misturas iniciais de concreto.

A.1 EXEMPLO 1. Convés da Ponte, Figura A.1.



FIGURA A.1. Projeto de deck de ponte. As proporções de mistura para um concreto que poderia ser usado neste projeto são desenvolvidas no Exemplo 1.

PASSO 1

Determinar os requisitos do projeto. Uma revisão das especificações desenvolve os seguintes requisitos:

n Baixa permeabilidade ao cloreto, aproximadamente 1.500 Coulombs em 56 dias

n Resistência à compressão de 4.500 psi em 28 dias

n Calor e retração reduzidos n

Taxa reduzida de ganho de resistência para minimizar

rachaduras n Proteção contra congelamento e descongelamento em um ambiente severo

A.1 EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO EM UNIDADES POLEGADAS-LIBRA

PASSO 2

Coordenar com o empreiteiro. As discussões com o empreiteiro desenvolvem os seguintes requisitos adicionais:

n O tamanho máximo do agregado grosso é de 1 pol. n A

queda desejada é de 4 a 6 pol. n O

concreto será colocado principalmente por bomba

ETAPA 3

Selecione a mistura inicial. Na Tabela A.1, selecione a mistura Colorado DOT como sendo uma boa mistura inicial.

Esta mistura tem as seguintes características:

Cimento	485 lb/yd ³
Cinzas volantes	97 lb/yd ³
sílica ativa	20 lb/yd ³
Máximo w/cm	0,41

PASSO 4

Determine o volume de ar necessário. Da Tabela 5.1 para agregado de 1 pol., o volume de ar necessário para um ambiente severo é de 6 por cento. Como esse concreto não terá uma resistência à compressão superior a 5.000 psi, não reduza o teor de ar em 1%.

PASSO 5

Incorporar agregados locais.

Primeiramente, determine o volume que a pasta irá ocupar, conforme tabela a seguir:

MATERIAL	MASSA, lb	VOLUME DE GRAVIDADE	ESPECÍFICO, ft ³
Cimento	485	3.15	2.47
Cinzas volantes	97	2,50	0,62
sílica ativa	20	2.20	0,15
Água (p/cm = 0,41)	247	1,00	3,96
Ar, 6 por cento	—	—	1,62

Volume total da pasta = 8,82 pés³

A.1 EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO EM UNIDADES POLEGADAS-LIBRA

Em segundo lugar, calcule volumes e massas agregados:

Peso específico do agregado grosso: 2,68
Peso específico do agregado miúdo: 2,64
Agregado fino: 40 por cento do volume total do agregado (Observação: Se uma proporção inicial apropriada de agregado fino para grosso não for conhecida, orientações sobre como selecionar as proporções iniciais do agregado podem ser encontradas no ACI 211.1.)
Volume de agregado = $27,00 \text{ ft}^3 - 8,82 \text{ ft}^3 = 18,18 \text{ ft}^3$ Volume
de agregado fino = $0,40 \times 18,18 \text{ ft}^3 = 7,27 \text{ ft}^3$ Massa de
agregado fino = $7,27 \text{ ft}^3 \times 62,4 \text{ lb/ft}^3 \times 2,64 = 1.198 \text{ lb}$ Volume de agregado
grosso = $18,18 \text{ ft}^3 - 7,27 \text{ ft}^3 = 10,91 \text{ ft}^3$ Massa agregada grosseira =
$10,91 \text{ ft}^3 \times 62,4 \text{ lb/ft}^3 \times 2,68 = 1.825 \text{ lb}$

PASSO 6

Prepare misturas de teste de laboratório. Não se esqueça do seguinte:

n Controle a dispersão de sílica ativa, consulte a Figura 5.4 para obter recomendações n Controle cuidadosamente e leve em conta a umidade nos agregados n Misture bem n Realize os testes necessários em concreto fresco e endurecido n Ajuste a mistura conforme necessário para obter as propriedades exigidas

PASSO 7

Realizar testes em escala de produção. Uma vez satisfeito com os resultados do programa de testes de laboratório, conduza testes em escala de produção. Considere estes pontos:

n Use lotes grandes o suficiente para serem representativos n Teste mais de uma vez
n Trabalhar com o empreiteiro para realizar testes de colocação e acabamento conforme necessário

A.1 EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO EM UNIDADES POLEGADAS-LIBRA

A.2 EXEMPLO 2. Estrutura de estacionamento moldada no local, Figura A.2.



FIGURA A.2. Projeto de estrutura de estacionamento. As proporções de mistura para um concreto que poderia ser usado neste projeto são desenvolvidas no Exemplo 2.

PASSO 1

Determinar os requisitos do projeto. Uma revisão das especificações desenvolve os seguintes requisitos:

- n Baixa permeabilidade ao cloreto, inferior a 1.500 Coulombs em 42 dias n
- Resistência inicial de 4.000 psi para permitir o estresse dos tendões n
- Resistência à compressão de 6.000 psi em 28 dias n
- Calor e encolhimento reduzidos n
- Proteção contra congelamento e descongelamento em um ambiente severo

PASSO 2

Coordenar com o empreiteiro. As discussões com o empreiteiro desenvolvem os seguintes requisitos adicionais:

- n O tamanho máximo do agregado grosso é de 1 pol.
- n A queda desejada é de 5 a 7 pol. n O concreto será colocado principalmente por bomba

A.1 EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO EM UNIDADES POLEGADAS-LIBRA

ETAPA 3

Selecione a mistura inicial. Na Tabela A.1, selecione a mistura da estrutura de estacionamento do aeroporto de Milwaukee como sendo uma boa mistura inicial. Esta mistura tem as seguintes características:

Cimento	565 lb/yd ³
Cinzas volantes (Classe C)	100 lb/yd ³
sílica ativa	40 lb/yd ³
Máximo w/cm	0,35

PASSO 4

Determine o volume de ar necessário. Da Tabela 5.1 para agregado de 1 pol., o volume de ar necessário para um ambiente severo é de 6 por cento. Como esse concreto terá uma resistência à compressão de mais de 5.000 psi, reduza o teor de ar em 1% e proporcione 5%.

PASSO 5

Incorporar agregados locais.

Primeiramente, determine o volume que a pasta irá ocupar, conforme tabela a seguir:

MATERIAL	MASSA, lb	VOLUME DE GRAVIDADE ESPECÍFICO, ft ³	
Cimento	565	3.15	2.87
Cinzas volantes	100	2,50	0,64
sílica ativa	40	2.20	0,29
Água (p/cm = 0,35)	247	1,00	3,96
Ar, 5 por cento	—	—	1.35

Volume total da pasta = 9,11 pés³

A.1 EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO EM UNIDADES POLEGADAS-LIBRA

Em segundo lugar, calcule volumes e massas agregados:

Peso específico do agregado grosso: 2,72
Peso específico do agregado miúdo: 2,68
Agregado fino: 40 por cento do volume total do agregado (<i>Observação: Se uma proporção inicial apropriada de agregado fino para grosso não for conhecida, orientações sobre como selecionar as proporções iniciais do agregado podem ser encontradas no ACI 211.1.</i>)
Volume de agregado = $27,00 \text{ ft}^3 - 9,11 \text{ ft}^3 = 17,89 \text{ ft}^3$
Volume de agregado fino = $0,40 \times 17,89 \text{ ft}^3 = 7,16 \text{ ft}^3$
Massa de agregado fino = $7,16 \text{ ft}^3 \times 62,4 \text{ lb/ft}^3 \times 2,68 = 1.200 \text{ lb}$
Volume de agregado grosso = $17,89 \text{ ft}^3 - 7,16 \text{ ft}^3 = 10,73 \text{ ft}^3$
Massa agregada grosseira = $10,73 \text{ ft}^3 \times 62,4 \text{ lb/ft}^3 \times 2,72 = 1.820 \text{ lb}$

PASSO 6

Prepare misturas de teste de laboratório. Não se esqueça do seguinte:

n Controle a dispersão de sílica ativa, consulte a Figura 5.4 para obter recomendações
 n Controle cuidadosamente e leve em conta a umidade nos agregados
 n Misture bem
 n Realize os testes necessários em concreto fresco e endurecido
 n Ajuste a mistura conforme necessário para obter as propriedades exigidas

PASSO 7

Realizar testes em escala de produção. Uma vez satisfeito com os resultados do programa de testes de laboratório, conduza testes em escala de produção. Considere estes pontos:

n Use lotes grandes o suficiente para serem representativos
 n Teste mais de uma vez
 n Trabalhar com o empreiteiro para realizar testes de colocação e acabamento conforme necessário

A.1 EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO EM UNIDADES POLEGADAS-LIBRA

A.3 EXEMPLO 3. Pilares de Concreto de Alta Resistência, Figura A.3.



FIGURA A.3. Projeto de colunas de alta resistência. As proporções de mistura para um concreto que poderia ser usado neste projeto são desenvolvidas no Exemplo 3.

PASSO 1

Determinar os requisitos do projeto. Uma revisão das especificações desenvolve os seguintes requisitos:

■ Resistência à compressão projetada de 14.000 psi em 28 dias ■

Sem exposição ao congelamento e descongelamento

A.1 EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO EM UNIDADES POLEGADAS-LIBRA

PASSO 2

Coordenar com o empreiteiro. As discussões com o empreiteiro desenvolvem os seguintes requisitos adicionais:

n O tamanho máximo do agregado grosso é de 1/2 pol. n A queda desejada é de 8 a 10 pol. n O concreto será colocado principalmente por bomba

ETAPA 3

Selecione a mistura inicial. Na Tabela A.1, selecione a mistura de alta resistência (Mistura 9) como sendo uma boa mistura inicial. Esta mistura tem as seguintes características:

Cimento	800 lb/ft ³
Cinzas volantes	175 lb/ft ³
sílica ativa	125 lb/ft ³
Máximo w/cm	0,23

PASSO 4

Determine o volume de ar necessário. Nenhum. Suponha que 1,5 por cento ficará preso nessa mistura.

PASSO 5

Incorporar agregados locais.

Primeiramente, determine o volume que a pasta irá ocupar, conforme tabela a seguir:

MATERIAL	MASSA, lb	VOLUME DE GRAVIDADE ESPECÍFICO, ft ³	
Cimento	800	3.15	4.07
Cinzas volantes	175	2,50	1.12
sílica ativa	125	2.20	0,91
Água (p/cm = 0,23)	254	1,00	4.07
Ar, 1,5 por cento	—	—	0,41

Volume total da pasta = 10,58 pés³

A.1 EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO EM UNIDADES POLEGADAS-LIBRA

Em segundo lugar, calcule volumes e massas agregados:

Peso específico do agregado grosso: 2,68 Peso
específico do agregado miúdo: 2,60 Agregado
fino: 38 por cento do volume total do agregado (<i>Nota: Se uma proporção inicial apropriada de agregado miúdo para grosso não for conhecida, orientações sobre como selecionar as proporções iniciais do agregado podem ser encontradas no ACI 211.1.</i>)
Volume de agregado = 27,00 ft ³ – 10,58 ft ³ = 16,42 ft ³ Volume de
agregado fino = 0,38 × 16,42 ft ³ = 6,24 ft ³ Massa de agregado
fino = 6,24 ft ³ × 62,4 lb/ft ³ × 2,60 = 1.012 lb Volume de agregado grosso =
16,42 ft ³ – 6,24 ft ³ = 10,18 ft ³
Massa agregada grosseira = 10,18 ft ³ × 62,4 lb/ft ³ × 2,68 = 1.702 lb

PASSO 6

Prepare misturas de teste de laboratório. Não se esqueça do seguinte:

n Controle a dispersão de sílica ativa, consulte a Figura 5.4 para obter recomendações n Controle cuidadosamente e leve em conta a umidade nos agregados n Misture bem n Realize os testes necessários em concreto fresco e endurecido n Ajuste a mistura conforme necessário para obter as propriedades exigidas

PASSO 7

Realizar testes em escala de produção. Uma vez satisfeito com os resultados do programa de testes de laboratório, conduza testes em escala de produção. Considere estes pontos:

n Use lotes grandes o suficiente para serem representativos n Teste mais de uma vez
n Trabalhar com o empreiteiro para realizar testes de colocação e acabamento conforme necessário

A.1 EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO EM UNIDADES POLEGADAS-LIBRA

TABELA A.1

PROPORÇÕES INICIAIS DE MISTURA DE CONCRETO DE SÍLICA-FUMA RECOMENDADAS PARA VÁRIAS APLICAÇÕES					
	CONVÉS DE PONTE DE CONCRETO Torre da Chave, Cleveland	DE ALTA RESISTÊNCIA, CONCRETO Scotia Plaza, Estado de Toronto	COM CINZAS MOSCAS de Nova York Mistura DOTHP	MOLHADO SHOTCRETE REPARAR	TEMPERATURA CONTROLADA CONCRETO H anford <small>Instalação de armazenamento</small>
	MISTURA 1	MISTURA 2	MISTURA 3	MISTURA 4	MISTURA 5
Referências	Nenhum	Bickley, et al, Alcompalle e 1991	Owens, 2000	Forrest, e outros, 1995	Holanda, 1998
Resistência à compressão (Nota 1)	12.000 psi em 28 dias	10.000 psi a > 5.400 psi em 28 dias	28 dias	6.000 psi a 5.000 psi em 28 dias	28 dias 6.000 psi em 90 dias
Cloreto rápido — teste, coulombs		303 em 1 ano 258 em 2 anos	< 1.600	—	—
Outros requerimentos	Bombeável, 57 histórias	— Minimizar rachaduras de plástico e retração por secagem		100 lb/cilindro 70°F, de fibras de aço <100°F, para aumentar resistência inicial de	Máximo entregue < 48 horas Bombeável, tenacidade para remoção de forma
Ar aprisionado (Nota 2)	—	—	6,50 por cento	8 a 10 por cento 2 a 6 por cento conforme entregue 4 a 6 por cento no local	6 por cento conforme
Queda	> 10 pol.	4 pol.	Desconhecido	2 a 4 pol.	Desconhecido
Tamanho máximo agregado	1/2 pol.	3/4 pol.	3/4 pol.	3/8 pol.	1 pol.
Cimento, lb/cyd	685	532	500	682	391
Cinzas volantes, lb/cyd	0	0	135, Classe F	0	150, Classe F
Cimento de escória, lb/cyd	285	198	0	0	0
Sílica ativa lb/cyd	80	62	40	70	60
Máximo p/cm	0,24	0,31	0,40	0,45	0,37
Água, lb/cyd (Nota 3)	252	244	270	338	167

Nota 1. A força mostrada é f_c. Adicione o overdesign apropriado para o desenvolvimento da mistura.

Nota 2. A redução permitida no conteúdo de ar para resistência acima de 5.000 psi foi considerada.

Nota 3. Inclui água no HRWRA para misturas com w/cm muito baixo.

A.1 EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO EM UNIDADES POLEGADAS-LIBRA

TABELA A.1 (continuação)

PROPORÇÕES INICIAIS DE MISTURA DE CONCRETO DE SÍLICA-FUMA RECOMENDADAS PARA VÁRIAS APLICAÇÕES					
	ALTO-DESEMPENHO ESTRUTURA VIGAS DE PONTE Milwaukee Colorado DOT	ESTACIONAMENTO ALTA RESISTÊNCIA Aeroporto	TESTE ALTA RESISTÊNCIA MISTURAR	TESTE MISTURAR	PONTE ÁREA COBERTA Colorado DOT
	MISTURA 6	MISTURA 7	MISTURA 8	MISTURA 9	MISTURA 10
Referências	Leonardo, 1999	Dados de Membro da SFA	Burg & Ost, 1994	Burg & Ost, 1994	Xi, e outros, 2003
Compressiva 6.500 psi na liberação de resistência (Nota 1)	2.000 psi em 36 horas 10.000 psi final	2.000 psi em 36 horas 5.700 psi em 56 dias	12.840 psi em 28 dias 16.760 psi em 3 anos	15.520 psi em 28 dias 18.230 psi em 3 anos	4.700 psi em 28 dias
Cloreto rápido - < 1.000 de núcleos - teste, coulombs em 2-10 meses				—	1.400–1.600 em 56 dias
Outros requerimentos	—	—	—	—	—
Ar aprisionado (Nota 2)	Desconhecido	Desconhecido	—	—	8,5 por cento
Queda	Desconhecido	6 a 7 1/2 pol.	9 3/4 pol.	9 1/4 pol.	5 1/2 pol.
Tamanho máximo agregado	Desconhecido	Desconhecido	1/2 pol.	1/2 pol.	Desconhecido
Cimento, lb/cyd	730	565	800	800	485
Cinzas volantes, lb/cyd	0	100, Classe C	100, Classe C	175, Classe C	97, Classe F
Cimento de escória, lb/cyd	0	0	0	0	0
Sílica ativa lb/cyd	35	39	40	125	20
Máximo p/cm	0,28	0,35	0,29	0,23	0,41
Água, lb/cyd (Nota 3)	214	246	270	254	247

Nota 1. A força mostrada é f_c. Adicione o overdesign apropriado para o desenvolvimento da mistura.

Nota 2. A redução permitida no conteúdo de ar para resistência acima de 5.000 psi foi considerada.

Nota 3. Inclui água no HRWRA para misturas com w/cm muito baixo.

A.1 EXEMPLOS DE PROPORCIONAMENTO EM UNIDADES POLEGADAS-LIBRA

TABELA A.1 (continuação)

CONCRETO DE SÍLICA-FUMA DE PARTIDA RECOMENDADO		
PROPORÇÕES DE MISTURA PARA VÁRIAS APLICAÇÕES		
	COMÉRCIO MUNDIAL CENTRO 1 Cidade de Nova York	MAR LESTE PONTE China
	MISTURA 11	MISTURA 12
Referências	Dados de mistura SCC de Norchem (2012)	Dados de Elkem (2002)
Resistência à compressão (Nota 1)	12.000 psi em 28 dias	7.250 psi em 28 dias
Teste rápido de cloreto, coulombs	—	< 750
Outros requerimentos	—	—
Ar aprisionado (Nota 2)	—	—
Queda	25-28 pol. (fluxo de queda)	10 pol.
Tamanho máximo agregado	0,60 pol.	Desconhecido
Cimento, lb/cyd	292	317
Cinzas volantes, lb/cyd	86, Classe F	47, Classe F
Cimento de escória, lb/cyd	470	476
Sílica ativa lb/cyd	51	25
Máximo p/cm	0,29	0,32
Água, lb/cyd (Nota 3)	261	276

Nota 1. A força mostrada é fc. Adicione o overdesign apropriado para o desenvolvimento da mistura.

Nota 2. A redução permitida no conteúdo de ar para resistência acima de 5.000 psi foi considerada.

Nota 3. Inclui água no HRWRA para misturas com w/cm muito baixo.

APÊNDICE 2

FICHA DE DADOS DE SEGURANÇA

A.2 Ficha de Dados de Segurança 195

A.2 FICHA DE DADOS DE SEGURANÇA

Ficha de dados de segurança - sílica ativa

Ficha de dados de segurança - sílica ativa

1. Substância e Identificação da Fonte

Nome do Produto: Sílica Fumaça (Pó Seco)

Usos ou aplicações do produto: Misturas Cimentícias

**Empresa
Informação:**

Localização da planta:

Telefone:

Local na rede Internet:

**Emergência
Telefone:**

CHEMTREC: 1-800-424-9300

2. Identificação de perigos

Classificação: Não atende aos critérios do Sistema Globalmente Harmonizado (GHS) da ONU para classificação de perigo.

Perigo físico: Não classificado

Perigo à saúde: Não classificado

Elementos de rotulagem:

Símbolo: Sem símbolo

Palavra Sinal: Nenhuma palavra de sinal

Declarações de perigo): Não aplicável.

Declarações de precaução) Não aplicável.

3. Composição/Informações sobre os Ingredientes

Substância: Silica Fume

Sinônimos: Amorphous Silica, Silicon Dioxide, Microsilica, Corrochem, Micropoz. 69012-64-2

Nº CAS: 273-761-1

Nº EINECS:

A sílica ativa pode conter vestígios (<0,05%) de sílica cristalina (quartzo), que demonstrou causar silicose e foi identificada pelo IARC e NTP como um possível carcinógeno humano.

A.2 FICHA DE DADOS DE SEGURANÇA

Ficha de dados de segurança - sílica ativa

8. Controles de exposição e proteção individual

Limites de exposição:	Nenhum limite de exposição ocupacional foi estabelecido para este material.		
Componentes:	Registro CAS #	OSHA-PEL TWA	ACGIH-TWA
Sílica, Sílica Amorfa fumaça	69012-64-2		TLV Retirado devido a dados insuficientes
Sílica – Quartzo γ cristalino	14808-60-7	0,05 mg/ m ³	0,025 mg/m ³

^R Medido como fração respirável do aerossol.

*Poeira Total

**Poeira respirável

Não há classificação de perigo para a quantidade de sílica cristalina respirável no produto porque quando medida por difração de Raios-X o nível é inferior a 0,1%.

Controles de Engenharia:	Forneça ventilação mecânica (exaustão geral e/ou local) suficiente para manter as exposições abaixo dos PELs ou TLVs nas áreas de processamento.
Proteção pessoal:	De acordo com OSHA 29 CFR 1910.132 subparte I, use equipamento de proteção individual (EPI) adequado para minimizar a exposição a este material.
Proteção respiratória:	Se as condições do local de trabalho exigirem um respirador OSHA 29CFR 1910.134 deve ser seguido. Consulte NIOSH 42 CFR 84 para respiradores aprovados quando as concentrações no ar forem iguais ou superiores aos Limites de exposição permitidos.
Proteção para os olhos/rosto:	Use óculos de segurança bem ajustados quando uma avaliação de risco indicar que isso é necessário.
Proteção da pele/corpo:	Escolha a proteção corporal em relação à tarefa que está sendo executada e aos riscos envolvidos e deve ser aprovada por um especialista. Luvas resistentes a produtos químicos devem ser usadas sempre ao manusear produtos químicos.

9. Propriedades Físicas e Químicas

claro a médio	Pó sub-micron amorfo – o pó tem tendência a aglomerar	Estado Físico: Cor: Cinza
Odor: Nenhum	Ponto de fusão: 1200°C - 1300°C*	Gravidade específica: pH: 6,0 a
9,0	Solubilidade em água: Insolúvel	Tamanho da partícula: Aprox. 8 a 48 lb./ft ³ ou
128-769 kg/m ³	Densidade aparente:	2,2 – 2,50 Água = 1,0
Solubilidade Solventes: Insolúvel a ligeiramente solúvel em solventes orgânicos		Aproximadamente. 0,4 µm

A.2 FICHA DE DADOS DE SEGURANÇA

Ficha de dados de segurança - sílica ativa

10. Estabilidade e reatividade

Condições a se evitar:	Veja abaixo
Substâncias a evitar:	Ácido fluorídrico (HF)
Reações perigosas:	A sílica ativa é solúvel em ácido fluorídrico (HF) e pode formar gás tóxico (SiF ₄).
Produtos de decomposição:	O aquecimento a temperaturas acima de 500°C (930°F) por períodos de tempo prolongados converterá a sílica amorfa em fases cristalinas.

11. Informações toxicológicas

Via de exposição: Inalação: X Pele: X Ingestão: N/A Olhos: X

Toxicidade aguda:

Inalação:	A poeira aerotransportada de sílica ativa gerada pelo uso ou manuseio deste produto pode resultar em irritação do trato respiratório.
Ingestão:	O pó de sílica ativa pode irritar e desidratar a garganta e a boca.
Contato visual:	O pó de sílica ativa pode causar irritação mecânica e ressecamento dos olhos.
Contato com a pele:	O pó de sílica ativa pode causar irritação mecânica da pele exposta.

Efeitos crônicos:

A sílica ativa é geralmente considerada uma poeira incômoda de baixa toxicidade, conseqüentemente, é considerada um risco mínimo de fibrose pulmonar (silicose). Evite a exposição prolongada a concentrações de poeira de sílica ativa acima dos limites de exposição recomendados, a menos que o equipamento de proteção seja usado.

É possível que a sílica ativa contenha vestígios (<0,05%) de sílica cristalina, que demonstrou causar silicose e foi identificada pelo IARC e NTP como um carcinógeno humano positivo/conhecido.

O aquecimento da sílica ativa a temperaturas acima de 500°C (930°F) por períodos de tempo prolongados irá converter a sílica amorfa nas fases cristalinas Cristobalita e Tridimita que podem causar silicose. O aumento das temperaturas aumentará a taxa de formação dessas fases.

12. Informações Ecológicas:

Não são esperados efeitos adversos. A Sílica Fume não é considerada perigosa para o meio ambiente.

13. Considerações sobre descarte:

Descarte os resíduos de acordo com os regulamentos federais, estaduais e locais aplicáveis.

A.2 FICHA DE DADOS DE SEGURANÇA

Ficha de dados de segurança - sílica ativa

14. Informações sobre transporte:

PONTO Não regulamentado

IATA Não regulamentado

IMDG Não regulamentado

Precauções especiais para o usuário: Nenhum

Transporte a granel de acordo com o Anexo II da MARPOL 73/78 e o código IBC: Não classificado

15. Informações Regulamentares:

SARA TÍTULO III: Seção 302/304 (substâncias extremamente perigosas) Não regulamentado

Seções 311/312 Categorias Perigosas (40 CFR 370.21)

Saúde Aguda: Não

Saúde crônica: Não

Fogo: Não

Reativo: Não

Pressão: Não

Seção 313 Este produto não contém produtos químicos sujeitos aos requisitos de notificação do fornecedor.

Não regulamentado

CERCLA: Lei de Responsabilidade e Compensação de Resposta Abrangente (40 CFR 30.4) Não regulamentado

TSCA: Nº CAS 69012-64-2 Listado
Não há produtos químicos TSCA 12(b) neste produto Nenhum

CEPA (DSL canadense): #69012-64-2 está listado na parte pública do Lista de Substâncias Domésticas.

WHMIS: Não classificado

Califórnia
Proposição 65: Este produto pode conter vestígios < 0,05% de sílica cristalina, uma substância química conhecida no Estado da Califórnia por causar câncer, defeitos congênitos ou outros danos reprodutivos.

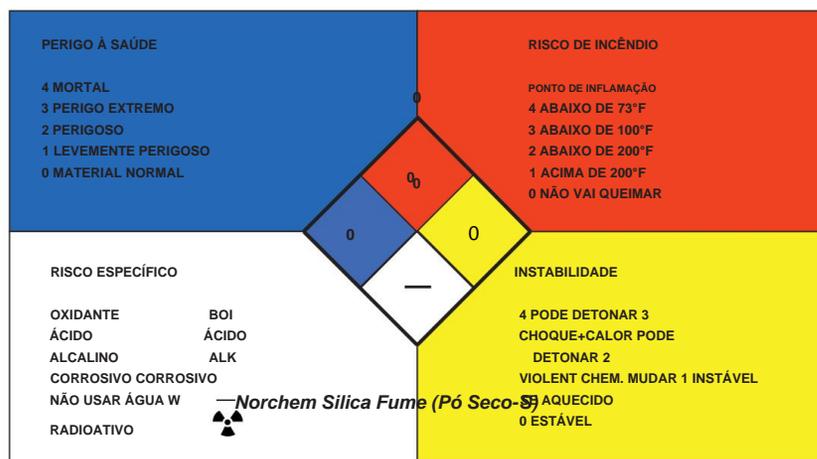
A.2 FICHA DE DADOS DE SEGURANÇA

Ficha de dados de segurança - sílica ativa

16. Outras informações:

As fichas de dados de segurança (SDS) do Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos (GHS) da ONU são exigidas apenas para substâncias e misturas que atendem aos critérios harmonizados para riscos físicos, de saúde ou ambientais. Com base no Capítulo 1.5.2, este produto não se enquadra nestes critérios.

Etiqueta de classificação da National Fire Protection Association (NFPA):



Etiqueta do Sistema de Identificação de Materiais Perigosos (HMIS):

Sílica Fumaça	
SAÚDE	1
INFLAMABILIDADE	0
REATIVIDADE	0
PROTEÇÃO PESSOAL	E

Todas as informações, recomendações e sugestões contidas nesta SDS, relativas aos nossos produtos, são baseadas em testes e dados considerados confiáveis, não podendo ser garantidos. Como o uso real por terceiros está além do nosso controle, é responsabilidade do usuário determinar a segurança, toxicidade e adequação para seu próprio uso do produto aqui descrito.

Foto na contracapa: One World Trade Center na cidade de Nova York, onde a sílica ativa foi usada em uma mistura ternária com cimento portland e cimento de escória para produzir as colunas de concreto de alta resistência de 69 MPa e 97 MPa e atingir o módulo de elasticidade necessário de 48 GPa.



Este manual destina-se a fornecer informações práticas para indivíduos que trabalham com sílica ativa e concreto de sílica ativa. Diferentes capítulos do Manual podem ser de interesse para especificadores de concreto, produtores de concreto, empreiteiros de concreto ou inspetores de concreto. O Manual está organizado da seguinte forma:

n Os capítulos 1 e 2 fornecem informações básicas explicando o que é sílica ativa e como ele reage no concreto.

ÿ O Capítulo 3 descreve os principais usos da sílica ativa no concreto. **n**

Capítulo 4 revisa a orientação ACI e especificações padrão para sílica fumaça.

n O Capítulo 5 apresenta informações detalhadas sobre dosagem de concreto contendo sílica ativa para diferentes aplicações. **n O**

Capítulo 6 apresenta recomendações para trabalhar com sílica ativa em uma fábrica de concreto.

n Capítulo 7 apresenta recomendações para colocação e acabamento de sílica ativa concreto em tabuleiros de pontes e outros trabalhos

planos. **n O Capítulo 8** discute o papel da sílica ativa em tornar o concreto mais sustentável.

ÿ O Capítulo 9 discute questões de saúde associadas ao trabalho com sílica ativa e apresenta recomendações para proteção pessoal. **ÿ O Capítulo 10** é

uma coleção de referências dos outros capítulos.

