

FIBER REINFORCED CONCRETE

LE BÉTON ARMÉ DE FIBRES



1988

BULLETIN 40a

Rapport préparé par Ernest K. Schrader
au nom du Comité des Etats-Unis des Grands Barrages (USCOLD)
approuvé par la 49^e Réunion Exécutive, Stockholm, mai 1981
mis à jour par Ernest K. Schrader en 1988

*Report prepared by Ernest K. Schrader
on behalf of the United States Committee on Large Dams (USCOLD)
approved by the 49th Executive Meeting, Stockholm, May 1981
updated by Ernest K. Schrader, 1988*

FIBER REINFORCED CONCRETE

LE BÉTON ARMÉ DE FIBRES



1988

BULLETIN 40a

AVERTISSEMENT – EXONERATION DE RESPONSABILITE:

Les informations, analyses et conclusions auxquelles cet ouvrage renvoie sont sous la seule responsabilité de leur(s) auteur(s) respectif(s) cité(s).

Les informations, analyses et conclusions contenues dans cet ouvrage n'ont pas force de Loi et ne doivent pas être considérées comme un substitut aux réglementations officielles imposées par la Loi. Elles sont uniquement destinées à un public de Professionnels Avertis, seuls aptes à en apprécier et à en déterminer la valeur et la portée et à en appliquer avec précision les recommandations à chaque cas particulier.

Malgré tout le soin apporté à la rédaction de cet ouvrage, compte tenu de l'évolution des techniques et de la science, nous ne pouvons en garantir l'exhaustivité.

Nous déclinons expressément toute responsabilité quant à l'interprétation et l'application éventuelles (y compris les dommages éventuels en résultant ou liés) du contenu de cet ouvrage.

En poursuivant la lecture de cet ouvrage, vous acceptez de façon expresse cette condition.

NOTICE – DISCLAIMER :

The information, analyses and conclusions referred to herein are the sole responsibility of the author(s) thereof.

The information, analyses and conclusions in this document have no legal force and must not be considered as substituting for legally-enforceable official regulations. They are intended for the use of experienced professionals who are alone equipped to judge their pertinence and applicability and to apply accurately the recommendations to any particular case.

This document has been drafted with the greatest care but, in view of the pace of change in science and technology, we cannot guarantee that it covers all aspects of the topics discussed.

We decline all responsibility whatsoever for how the information herein is interpreted and used and will accept no liability for any loss or damage arising therefrom.

Do not read on unless you accept this disclaimer without reservation.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	5
Avant-propos du Bulletin 40	7
1. Introduction	8
2. Propriétés du béton armé de fibres (BAF)	8
3. Recherches et dévelop- pement	12
4. Expérience des ouvrages hydrauliques	14
5. Conception et méthodes de construction.....	24
6. Matériaux et dosages	26
7. Gâchage, malaxage, trans- port, mise en place	34
8. Finition	42
9. Contrôle de la qualité.....	46
10. Références	50

TABLE OF CONTENTS

Foreword	5
Foreword to Bulletin 40	7
1. Introduction	9
2. Properties of Fiber Rein- forced Concrete (FRC)....	9
3. Research and Develop- ment	13
4. Experience with Hydraul- lic Structures.....	15
5. Design Concepts and Construction Methods	25
6. Materials and Proportio- ning	27
7. Batching, Mixing, Trans- porting and Placing.....	35
8. Finishing	43
9. Quality Control	47
10. References.....	50

FOREWORD

The first Edition of Bulletin 40 was prepared six years ago after successful uses of the "first generation" of fibers in concrete. These fibers required special mix designs, slower production, small aggregate, and high cementitious contents. Improved fibers have now become available which can be easily introduced into more normal mix designs without significantly slowing the batching process. This new edition (Bulletin 40a) addresses the effect of new fibers on previous recommendations for FRC (Fiber Reinforced Concrete). It also updates performance information and discusses new testing/evaluation methods for FRC and the various fibers available.

Ing. Paolo BERTACCHI
*Chairman, Committee on Materials
for Concrete Dams*
September 1988

AVANT-PROPOS

La première édition du Bulletin 40 fut préparée, il y a six ans, après le succès remporté par la « première génération » de fibres dans le béton. Ces fibres nécessitaient une composition spéciale du béton, une fabrication lente, des granulats de petite taille et une haute teneur en ciment. Des fibres améliorées sont maintenant disponibles, qui peuvent être facilement utilisées avec des bétons de composition plus normale, sans ralentir de façon significative la production des gâchées. Dans cette nouvelle édition (Bulletin 40a), on a modifié les précédentes recommandations pour tenir compte de l'effet des nouvelles fibres. On a également mis à jour les informations sur les performances et discuté les nouvelles méthodes de contrôle pour le béton armé de fibres et les différentes fibres disponibles.

Ing. Paolo BERTACCHI
*Président, Comité des Matériaux
pour Barrages en Béton*
Septembre 1988

FOREWORD TO BULLETIN 40 (1982)

The Subcommittee on Materials for Concrete Dams, a new division of the Committee on Materials for Dams, was formed at the 45th Executive Meeting in Salzburg, 1977.

New research subjects were discussed. One such subject requiring further investigation was concrete having particular characteristics of strength, extensibility, and ductility, i.e., fiber reinforced concrete, concrete mixed or impregnated with polymers, etc. In Cape Town (1978) at the Meeting of the Committee on Materials, USCOLD offered to prepare a report entitled « Concrete Reinforced with Fibers. » This report was circulated in 1980 for comment by the National Committees and is now ready for release.

The purpose of this paper is to provide state-of-the-art background concerning the development of fiber-reinforced concrete (FRC), to show where it can be and has been used to advantage in dam construction and repairs, to provide some guidance for design, to discuss fresh and hardened material properties, to discuss proportioning, and to cover the particularities of batching, mixing, placing and finishing it in the field.

Milan-Chicago, January 1982

P. BERTACCHI*

*Chairman,
Committee on Materials for Dams*

J.A. VELTROP**

*Chairman,
Sub-Committee on Materials for Concrete Dams*

* Prof. Ing. ** Also currently Chairman. USCOLD.

AVANT-PROPOS DU BULLETIN 40 (1982)

Le Sous-Comité des Matériaux pour Barrages en Béton a été formé au sein du Comité des Matériaux pour Barrages à la 45^e Réunion Exécutive tenue à Salzbourg en 1977.

De nouveaux sujets de recherche ont été débattus. L'un de ceux qui ont retenu l'attention concernait un béton à caractéristiques particulières de résistance, d'extensibilité et de ductibilité, c'est-à-dire le béton armé de fibres, le béton malaxé avec des polymères ou imprégné par eux, etc. Au Cap, en 1978, à la réunion du Comité des Matériaux, USCOLD (Comité des États-Unis des Grands Barrages) proposa de préparer un rapport intitulé « Béton armé de fibres ». Ce rapport fut présenté pour avis en 1980 aux Comités Nationaux de la CIGB et sa mise au point est maintenant achevée.

Le but de ce rapport est de fournir en toile de fond l'état actuel de développement du béton armé de fibres (BAF), de montrer où celui-ci peut être et a été utilisé avantageusement dans la construction, la réparation des barrages, de fournir des directives au stade du projet, de discuter des propriétés du béton frais ou ayant fait prise ainsi que des dosages, et de traiter des pratiques de chantier en matière de gâchage, malaxage, mise en place et finition.

Milan-Chicago, janvier 1982

P. BERTACCHI*

*Président du Comité
des Matériaux pour Barrages*

J.A. VELTROP**

*Président du Sous-Comité
des Matériaux pour Barrages en Béton*

* Prof. Ing. ** Egalement actuel Président du Comité des États-Unis des Grands Barrages.

1 — INTRODUCTION

Des millions de mètres cubes de béton sont utilisés dans la construction des barrages et de leurs ouvrages annexes. Dans beaucoup de ces ouvrages, la masse ou le poids sont les caractéristiques requises en priorité. La résistance à la compression, qu'exige un tel béton, est relativement facile à obtenir, le problème étant de savoir comment le réaliser de la façon la plus économique et assurer néanmoins une bonne stabilité dimensionnelle. Cependant, dans de nombreux ouvrages hydrauliques, il existe des zones critiques qui ne nécessitent pas d'importantes masses de béton, mais qui exigent que le béton soit de très bonne qualité et de résistance très élevée. Le béton classique non armé a des performances limitées, quand les propriétés suivantes des matériaux sont importantes : résistance à la fatigue, à la cavitation, à l'érosion, au choc, à la flexion et à la traction, capacité de charge après fissuration, et haute résistance au cisaillement. Le béton armé de fibres (BAF), béton utilisant un renforcement par des fibres discontinues, réparties au hasard dans le mélange, est un matériau de construction permettant d'obtenir ces propriétés. Les caractéristiques exceptionnelles de répartition des pressions du béton mouillé et la forte cohésion ou résistance à l'arrachement du béton durci armé de fibres ont été utilement employées pour des barrages importants. Le béton armé de fibres (BAF) est essentiellement un mélange classique qui contient une répartition uniforme de fibres discontinues ou d'éléments semblables à des fils de fer. Les fibres renforcent la matrice du ciment ou de la partie « mortier » du béton et créent ainsi un matériau composite résistant à la fissuration. Théoriquement, les fibres empêcheront ou retarderont la propagation de micro-fissures ou de défauts internes inhérents au béton. Les longueurs types de fibres sont de l'ordre de 19 à 65 mm avec des diamètres (coupe transversale) de 0,25 à 0,75 mm. Il existe plusieurs types de fibres utilisables, mais celles qui conviennent le mieux à la construction des barrages et des ouvrages annexes sont en acier. La fibre de verre est aussi disponible et convient aussi à certains revêtements de mince épaisseur, tels que des matériaux appliqués pneumatiquement. Les fibres de polypropylène et les fibres organiques ont été étudiées et mises récemment sur le marché principalement pour la construction d'habitations et de dalles. Les avantages de leur utilisation dans le domaine des barrages n'ont pas encore été démontrés.

Le présent rapport vise à faire le point de la technique actuelle du béton armé de fibres (BAF), à montrer où il peut être et où il a été utilement employé dans la construction et la réparation des barrages, à donner des recommandations pour la conception, à discuter des propriétés de ce matériau, à l'état frais et après prise, ainsi que des dosages, et à traiter de points pratiques relatifs au gâchage, au malaxage, à la mise en place et à la finition du BAF au chantier.

2 — PROPRIÉTÉS DU BÉTON ARMÉ DE FIBRES

Comme celles du béton classique, les propriétés de ce matériau, à l'état frais et après prise, peuvent varier considérablement selon les caractéristiques du ciment, la qualité des granulats, la composition du béton et le type de fibres. La préparation des éprouvettes et leurs dimensions (on le verra plus loin) peuvent aussi affecter,

1 — INTRODUCTION

Millions of cubic yards of concrete are used in the construction of dams and their appurtenant structures. In many of these structures, mass or weight is the primary characteristic needed. The required compressive strength of such concrete is relatively easy to obtain, the problem being how to obtain it most economically and still ensure dimensional stability. However, there also are critical areas in many hydraulic structures which do not require large masses of concrete but do require extremely high quality and strength. Conventional unreinforced concrete has limited capability where the following material properties are important : fatigue strength, cavitation and erosion resistance, impact strength, flexural strength and strain capacity, post-crack load-carrying capability, and high shear strength. Fiber reinforced concrete (FRC), a concrete utilizing randomly oriented discrete fiber reinforcement in the mixture, is a construction material capable of developing these properties. The unique form pressure distribution characteristics of the wet concrete and the high bond strength or pullout resistance of hardened fibrous concrete are other features which have been used to advantage on major dams. FRC is basically a conventional mixture which contains a uniform distribution of discrete fibers or wire-like elements. The fibers reinforce the cement matrix or mortar portion of the concrete, creating a crack-resistant composite material. In theory, the fibers prevent or retard the propagation of microcracks and internal flaws inherent in concrete. Typical fiber lengths are on the order of 0.75 to 2.5 in (19 to 65 mm) with cross-sectional diameters of 0.01 to 0.03 in (0.25 to 0.75 mm). Many types of fiber materials are available, but the ones primarily suitable for use in dams and related construction are steel. Fiberglass is also available and suited for specialized thin coatings such as pneumatically applied materials. Polypropylene and organic fibers have been researched and recently marketed primarily for residential and slab construction. Their beneficial use in dams has not yet been demonstrated.

The purpose of this paper is to provide a discussion on the state-of-the-art of FRC, to show where it can be and has been used to advantage in dam construction and repairs, to provide some guidance for design, to discuss fresh and hardened material properties, to discuss proportioning, and to cover the practicalities of batching, mixing, placing, and finishing FRC in the field.

2 — PROPERTIES OF FIBER REINFORCED CONCRETE

As with conventional concrete, the fresh and hardened material properties of FRC can have a considerable range depending on cement factors, aggregate quality, mix design, and fiber types. Specimen preparation and size, as discussed later, can also have a significant effect on test results. Table 1 compares some of

de manière sensible, les résultats des essais. Le Tableau 1 compare quelques-unes des propriétés du BAF et des matériaux en couches minces armés de fibres [1, 5, 6, 9, 10, 13, 18, 21, 22], avec celles du béton classique.

Du fait que le béton a toujours été un matériau relativement fragile, cette caractéristique a été en général acceptée. On n'a fait aucun effort sérieux dans le passé pour quantifier sa résistance au choc et sa dureté. Exception faite des essais spéciaux exécutés sur le béton de masse pour déterminer le nombre de contrôles de température nécessaires à la prévention de la fissuration thermique, la capacité de déformation par traction est aussi habituellement négligée. Pourtant, ces propriétés sont souvent des propriétés critiques qui peuvent être la cause première d'une rupture dans le béton soumis à de sévères érosions et cavitations. Le renforcement par des fibres améliore sensiblement ces propriétés, ce qui explique que, dans de nombreuses applications sur le chantier, le BAF, ayant une plus grande résistance à la compression, réussit mieux que le béton classique. Le Comité du BAF de l'Institut Américain du Béton, reconnaissant l'utilité d'une évaluation de ces propriétés, a publié un rapport [1] auquel il est bon de se référer pour des méthodes d'essai et des comparaisons supplémentaires avec le béton classique.

TABLEAU 1
Augmentation relative des caractéristiques des matériaux armés
de fibres par rapport à celles du béton classique

	BAF	Fibre de verre « projetées »
Dureté.....	100 à 1 200 %	1 000 %
Résistance au choc.....	100 à 1 200 %	1 000 %
Résistance à la première fissure	25 à 100 %	50 à 300 %
Résistance à la traction de flexion	25 à 200 %	50 à 300 %
Résistance à la traction.....	25 à 150 %	300 à 800 %
Résistance à la fatigue.....	50 à 100 %	—
Capacité de déformation.....	50 à 300 %	1 000 à 10 000 %
Résistance à la compression.....	- 25 à 25 %	200 à 800 %
Résistance à la cavitation/érosion.....	300 %	—
Module d'élasticité	- 25 à 25 %	—
Flèche.....	20 à 500 %	100 à 1 000 %

La résistance à la cavitation/érosion, la résistance à la traction, le module de rupture, la dureté, la capacité de déformation, la résistance au choc, la résistance à la fatigue et la maniabilité sont les propriétés du matériau sur lesquelles les fibres agissent le plus. Il est important d'analyser les raisons majeures de cette action, afin de mieux comprendre le comportement du matériau et son mode de rupture à la « première fissure » et sous la charge maximale. Dans un mélange idéal de BAF, chaque micro-fissure ou défaut interne est armé d'une fibre située près du point de fissure. Sous contraintes et en l'absence de fibres, les micro-fissures se propagent au fur et à mesure de l'application de la charge ou de la contrainte et s'interconnectent jusqu'à ce que la rupture finale ait lieu, sous forme d'une séparation totale de la masse de béton en deux ou plusieurs morceaux. L'énergie

the physical properties of FRC and thin fiberglass [1, 5, 6, 9, 10, 13, 18, 21, 22] reinforced cementitious materials with conventional concrete.

Because concrete has always been a relatively brittle material, this characteristic has been generally accepted. No serious effort has been made in the past to quantify impact resistance and toughness. With the exception of special testing done for mass concrete to determine the amount of temperature control required to prevent thermal cracking, tensile strain capacity is also usually neglected. However, these are often critical properties which can be the primary cause of failure in concrete subjected to severe cavitation/erosion. These properties are markedly improved with the use of fiber reinforcement which probably is the reason why, in many field applications, FRC has performed better than conventional concrete of higher compressive strength. The American Concrete Institute's Committee for FRC recognized the need for evaluating these properties and has published a report [1] which should be referred to for test methods and additional comparisons to conventional concrete.

TABLE 1
*Approximate Increase in Material Properties —
 Fiber Reinforced Versus Conventional Concrete Materials*

	<i>FRC</i>	<i>Fiberglass "Spray-on"</i>
Toughness	100 to 1 200 %	1 000 %
Impact Resistance.....	100 to 1 200 %	1 000 %
First Crack Strength	25 to 100 %	50 to 300 %
Tensile Bending Strength	25 to 200 %	50 to 300 %
Tensile Strength	25 to 150 %	300 to 800 %
Fatigue Endurance	50 to 100 %	—
Strain Capacity	50 to 300 %	1 000 to 10 000 %
Compressive Strength	— 25 to 25 %	200 to 800 %
Cavitation/Erosion Resistance	300 %	—
Modulus of Elasticity.....	— 25 to 25 %	—
Flexural Deflection	20 to 500 %	100 to 1 000 %

The material properties most affected by fibers are cavitation/erosion resistance, tensile strength, modulus of rupture, toughness, strain capacity, impact resistance, fatigue strength, and workability. It is important to understand the basic reasons why fibers alter these properties, so that the material's behavior and its failure mode at "first crack" and ultimate load can be better understood. For an ideal FRC mixture, each internal microcrack and flaw is reinforced with a fiber located near the crack tip. Under stress and without the presence of fibers, the microcracks propagate with load or stress application and interconnect until an ultimate failure occurs in the form of total separation of the concrete mass into two or more pieces. The energy required to propagate a crack or flaw in conventional concrete is low, usually only about half that required to initiate one.

nécessaire à la propagation d'une fissure ou d'un défaut dans du béton classique est négligeable, évaluée généralement à la moitié environ de celle qu'implique leur formation. Les fibres permettent que l'énergie nécessaire, en leur absence, à la propagation de la micro-fissure soit distribuée à la mini-masse de la matrice du liant qui l'entoure. Ainsi, il faut davantage d'énergie pour propager la fissure et, dans ce cas, l'énergie doit être suffisante pour étirer la fibre jusqu'à la charge maximale ou la faire sortir de la matrice qui l'entoure. La charge maximale atteinte, les fibres continueront normalement à relier les fragments de béton et à supporter une charge inférieure à la charge maximale.

L'indice de dureté [1, 2, 14] est un chiffre sans dimension qui peut être déterminé par une nouvelle méthode d'essai normalisée. Cette méthode compare la quantité d'énergie exigée pour que soit fissurée une poutre en béton à celle qui est nécessaire pour l'amener à des degrés donnés de flèche ou de rupture. La dureté est déterminée en utilisant la surface sous la courbe de charge, selon une méthode analogue à celle qu'on utilise pour des matériaux ductiles tels que l'acier.

La résistance au choc peut aussi être déterminée par une nouvelle méthode d'essai qui compte le nombre de chocs nécessaires pour qu'une masse de 4,5 kg tombant de 450 mm fissure et casse en morceaux un échantillon standard [1, 21].

La résistance à la cavitation/érosion du BAF a fait l'objet d'essais dans des conditions de véritable cavitation, identiques à celles réalisées dans l'évacuateur d'un barrage, de hauteur de chute élevée [13]. Sous une charge de 75 m, l'eau passait sur des éprouvettes de matériaux divers, à une vitesse de 35 m/s et à un débit de 1,7 m³/s. Des irrégularités ont été délibérément incorporées au réseau d'écoulement juste en amont de la zone de l'essai, afin de créer des conditions sévères de cavitation. Lorsque l'érosion résulte de l'usure continue du matériau superficiel par un courant de faible débit et de faible chute, les fibres ne devraient pas avoir un effet significatif sur le taux d'usure, à moins que l'érosion ne soit aussi le résultat du frottement et des impacts de gros débris sur la surface, ce qui peut arriver dans les bassins d'amortissement. En fait, quelques essais indiquent que, pour des rapports eau/ciment élevés, le BAF peut présenter un taux d'usure plus grand que celui du béton identique sans fibres. Pour de faibles rapports eau/ciment, les taux d'usure sont les mêmes [6, 16].

3 — RECHERCHES ET DÉVELOPPEMENT

Les bibliographies sur la BAF [9, 10, 11] énumèrent approximativement 1 200 documents dont une grande partie présente les mêmes études de base sur la fatigue à la flexion, les dosages des mélanges, le comportement au cisaillement et à la fissuration, la ductilité et la conception des poutres ou des dalles sur pentes. Ces données ont des applications directes ou indirectes aux barrages et ouvrages annexes, mais des recherches complémentaires sont nécessaires pour étudier la fatigue par vibrations (vibrations de haute fréquence, de basse amplitude) se produisant dans les ouvrages d'évacuation, dans les bassins d'amortissement et dans d'autres organes des barrages.

Des recherches sont aussi nécessaires sur les matériaux composites armés de fibres, contenant des polymères et du latex. Des utilisations limitées de ces matériaux composites indiquent une résistance très élevée à la cavitation et à l'érosion [13, 16, 23].

With fibers present, the energy that otherwise would propagate the microcrack is distributed through bond to the mini-mass of cementing matrix around it. Thus more energy is required to propagate the crack, and when it does, sufficient energy must be supplied to either stretch the fiber to ultimate load or continually pull it out of the surrounding matrix. Even after ultimate load is reached, the fibers will typically continue to hold the broken fragments of concrete together and carry some load less than ultimate.

The "toughness index" [1, 2, 14] is a dimensionless number that can be determined by a new standard test method. This method compares the amount of energy required to crack a concrete beam to the energy required to bring the beam to given degrees of deflection or failure. Toughness is determined by using the area under the load deflection curve much the same as is done for ductile materials such as steel.

Impact resistance can also be determined by a new test method that counts the number of blows required for a 10 lb (4.5 kg) mass dropping 18 in (450 mm) to crack and then separate a standard-size piece of the test material [1, 21].

Cavitation/erosion resistance of FRC has been tested under conditions of true cavitation similar to those experienced in the outlet of a high head dam [13]. Under a head of 240 ft (75 m), water was passed over test specimens of various concretes at a velocity of 120 ft/s (35 m/s) and flow of 60 ft³/s (1.7 m³/s). Irregularities were deliberately built into the flow pattern just upstream of the test area to create a serious cavitation condition. Where erosion is caused by the continuous wearing away of surface material by low velocity at low head, fibers should not be expected to have a significant effect on the wear unless the erosion is also caused by large debris rolling around and impacting the surface, as can occur in stilling basins. In fact, some tests indicate that at high water-cement ratios, FRC can have a higher wear rate than similar concrete without fibers. At low water-cement ratios, the wear rates are similar [6, 16].

3 — RESEARCH AND DEVELOPMENT

Bibliographies of FRC publications [9, 10, 11] list approximately 1 200 documents. Most of the reported research consists of the same basic studies on flexural fatigue, mixture proportions, shear, cracking behavior, ductility, and design of beams or slabs on grade. These data have application directly or indirectly to dams and appurtenant structures, but additional research is needed to study vibrational fatigue (high-frequency, low-amplitude vibration) occurring in outlets, stilling basins, and other parts of dams.

Research is also needed on special composites of fiber reinforced materials containing polymers and latex. Limited work with these composites indicates exceptional resistance to cavitation and erosion [13, 16, 23].

Les recherches les plus utiles concernant l'utilisation du BAF pour des parties de grands barrages, pouvant être soumises à des débits de vitesse élevée et à des forces de cavitation, ont été menées au centre d'essais de haute chute au Barrage de Détroit aux Etats-Unis [13]. Ces essais mettent en évidence le fait que, dans des conditions réelles de fonctionnement (et non sur de petits modèles de laboratoire), les dalles de BAF résistent aux dommages de cavitation/érosion environ trois fois mieux que le béton classique de haute qualité, préparé avec des granulats et composants identiques.

4 — EXPÉRIENCE DES OUVRAGES HYDRAULIQUES

Le BAF a été utilisé dans la construction de différents organes de barrages depuis 1970 environ. Antérieurement, des problèmes concernant la pratique du malaxage et de la mise en place du BAF freinèrent son utilisation. Cependant, depuis lors, le BAF s'est avéré adaptable et utile pour les réparations et modifications de structures existantes et pour les zones critiques de nouvelles constructions. Bon nombre de réparations étaient consécutives à des dégâts dus à la cavitation et à l'érosion, mais d'autres utilisations comprennent : la stabilisation de talus rocheux, le soutènement de galeries d'accès, la réparation de murs d'écluses de navigation, le revêtement d'étanchéité et la réparation de détériorations importantes de béton de masse résultant des mouvements relatifs des joints des plots. Le comportement satisfaisant des nouvelles constructions et de ces réparations dans les zones où le béton classique avait auparavant montré une défaillance a amené les techniciens à utiliser le BAF dans les zones critiques d'ouvrages lors de leur construction. Le Tableau 2 présente une liste de barrages où l'on a utilisé le BAF.

Les résultats ont été excellents pour tous les ouvrages cités dans le Tableau 2 ci-après, un seul excepté, le bassin d'amortissement du barrage de Kinzua (USA). Il apparut que le béton armé de fibres avait des qualités et propriétés très différentes de celles retenues lors de l'étude. On peut maintenant s'interroger sur l'opportunité d'utiliser du BAF pour cet ouvrage soumis à une lente érosion. Quelques autres ouvrages sur lesquels le BAF a été utilisé sont examinés ci-après.

Le barrage de Libby (USA) est un barrage-poids en béton, de 127 mètres de hauteur, comprenant trois pertuis rectangulaires de fond et deux pertuis d'évacuateur de crue. Au début de l'année 1974, le BAF a été utilisé pour la réparation des principaux dégâts dus à la cavitation dans une vidange. Les dégâts et les méthodes de réparation ont été exposés en détail par Schrader et Kaden [24]. Avant ces avaries, la vidange avait été utilisée pendant 16 mois environ, passant des débits de 57 à 1 339 m³/s. Après cette période de fonctionnement, des dégâts dus à une cavitation importante furent remarqués et environ 30 m³ de béton de résistance élevée, fortement armé, furent enlevés. Des réparations furent réalisées sur les murs et sur le radier avec du BAF, ancré solidement à l'aide de barres. Depuis la réparation, le béton a été soumis à plus d'épreuves (12 ans d'utilisation intermittente) que le béton d'origine et aucun dégât n'est décelable. Par la suite, les deux autres vidanges du barrage ont été réparées avec du BAF lorsque des dégâts identiques ont été découverts dans le béton classique. En 1978, des réparations furent exécutées dans le bassin d'amortissement du barrage de Libby où quelque 1 500 m³ de béton avaient été érodés au fond du bassin d'amortissement par des

The most useful research concerning the applicability of FRC to areas in large dams which could be subjected to high-velocity flows and cavitation forces was conducted at the Detroit Dam (U.S.A.) high-head test facility [13]. These tests clearly showed that under true field conditions (not small laboratory models), FRC slabs resist the damage of cavitation/erosion approximately three times better than high-quality conventional concrete made with the same aggregates and mixture ingredients.

4 — EXPERIENCE WITH HYDRAULIC STRUCTURES

FRC has been used in various features of dam construction since about 1970. Prior to this, concern about the practicality of mixing and placing FRC in a heavy construction environment restrained its use. However, FRC has since proven to be a field-adaptable and useful material in repairs and modifications to existing structures and in critical areas of new construction. Many repairs have been needed because of cavitation and erosion damage, but other uses include rock slope stabilization, adit support, navigation lock wall repair, impervious lining, and rebuilding extensive deterioration of mass concrete resulting from relative monolith joint movements. The satisfactory performance of new constructions and these repairs in areas where conventional concrete had previously failed has given designers confidence in using FRC in critical areas as a part of original construction. Table 2 lists some dams where FRC has been used.

Performance has been excellent at all except one of the projects listed in Table 2. At Kinzua Dam (U.S.A.), evaluation of the fiber concrete indicated that its quality and properties were significantly different from those designed. The applicability of FRC to that particular project, where slow erosive action was occurring, may now be questioned. Discussion of some of the other listed FRC projects follows.

Libby Dam (U.S.A.) is a concrete gravity structure 414 ft (127 m) high with three rectangular low-level outlets and two spillway bays. In early 1974, FRC was used to repair major cavitation damage in one outlet. The damage and repair methods have been previously reported in detail by Schrader and Kaden [24]. Prior to damage, the outlet had been in operation for about 16 months, passing discharges of 2 000 to 47 000 ft³/s (57 to 1 339 m³/s). After this period of operation, sudden severe cavitation damage was experienced and approximately 40 yd³ (30 m³) of high-strength concrete with considerable reinforcement was removed. Repairs were made in the walls and invert using FRC secured in place with anchor bars. Since the repair, the concrete has been subjected to more service (12 years of intermittent service) than the original concrete, and it shows no evidence of distress. Subsequently, the other two outlets in the dam have been repaired with FRC when similar damage was found in the conventional concrete. In 1978, repairs were completed in the stilling basin at Libby Dam where about 2 000 yd³ (1 500 m³) of concrete had been eroded from the stilling basin floor by trapped debris and by cavitation at the spillway to stilling basin transition. Reinforcing steel had

TABLEAU 2
Applications du BAF

Ouvrage	Pays	Utilisation
Barrage de Libby	USA	— Réparations de conduit de vidange — Réparations du bassin d'amortissement
Barrage de Dworshak	USA	— Dalle d'un ouvrage annexe — Réparations de conduit de vidange — Réparations du bassin d'amortissement
Barrage de Lucky Peak	USA	— Réparation rapide du rebord de l'auge de déflexion
Barrage d'Applegate	USA	— Protection de talus rocheux
Barrage de Little Goose	USA	— Déflecteurs d'évacuateur de crue — Encastrement des rails de grue — Réparation de mur d'écluse de navigation
Barrage de Bonneville	USA	— Protection de talus rocheux — Protection contre l'érosion du canal de fuite
Barrage de McNary	USA	— Déflecteurs d'évacuateur de crue
Barrage de Kinzua	USA	— Bassin d'amortissement
Barrage de Lower Monumental	USA	— Réparation de conduit de l'écluse de navigation — Réparation de mur d'écluse de navigation — Déflecteurs d'évacuateur de crue
Barrage de Ririe	USA	— Protection de talus rocheux — Soutènement de galerie d'accès
Ouvrage d'Old River	USA	— Réparation du bassin d'amortissement
Barrage d'Oxbow	USA	— Réparation d'évacuateur de crue
Barrage de Mayfield	USA	— Réparation du bassin de dissipation
Barrage d'Alder	USA	— Réparation du bassin de dissipation
Barrage de Karun	Iran	— Réparations locales d'évacuateur de crue
Chutes de Pilot Butte	USA	— Envisagé pour la réparation du bassin de réception et du bassin d'amortissement
Barrage de Tarbela	Pakistan	— Réparation du bassin d'amortissement — Modification d'évacuateur de crue — Rebord de la cuillère de déflexion
Barrage de Little Para	Australie	— Protection du rebord de la cuillère de déflexion et du rocher du bassin de dissipation
Barrage de Beetaloo	Australie	— Envisagé pour les dents de dissipation
Barrage d'Itaipu	Brésil	— Zones de l'évacuateur de crue susceptibles de présenter de la cavitation
Lac de Toutlé	USA	— Revêtement en béton projeté pour la galerie hydraulique creusée dans la roche
Barrage de Port Melon	Canada	— Reconstruction de la crête érodée de l'évacuateur de crue
Barrage de Barr Lake	USA	— Masque amont incliné, en béton, du barrage en remblai
Ecluse et Barrage n° 2 du fleuve Mississippi	USA	— Radier de l'écluse de navigation

matériaux piégés et par la cavitation sur la transition entre l'évacuateur de crue et le bassin d'amortissement. Des armatures du béton armé avaient également été arrachées. On répara en étendant une couche de BAF sur le béton classique. Quelques érosions superficielles se sont produites sur le BAF, mais c'est insignifiant par rapport aux dégâts survenus dans le béton classique d'origine; aucune réparation n'a été nécessaire.

TABLE 2
Applications of FRC

<i>Project</i>	<i>Country</i>	<i>Use</i>
Libby Dam	USA	— Outlet conduit repairs — Stilling basin repairs — Appurtenant structural slab
Dworshak Dam	USA	— Outlet conduit repairs — Stilling basin repairs
Lucky Peak Dam	USA	— Expedient flip lip repair
Applegate Dam	USA	— Rock slope protection
Little Goose Dam	USA	— Spillway deflectors — Crane rail encasement — Navigation lock wall repair
Bonneville Dam	USA	— Rock slope protection — Tailrace erosion protection
McNary Dam	USA	— Spillway deflectors
Kinzua Dam	USA	— Stilling basin
Lower Monumental Dam	USA	— Navigation lock conduit repair — Navigation lock wall repair — Spillway deflectors
Ririe Dam	USA	— Slope protection — Adit support
Old River Structure	USA	— Stilling basin repair
Oxbow Dam	USA	— Spillway repair
Mayfield Dam	USA	— Plunge pool repair
Alder Dam	USA	— Plunge pool repair
Karun Dam	Iran	— Spillway patching
Pilot Butte Chute	USA	— Considered for plunge pool/stilling basin repair
Tarbela Dam	Pakistan	— Stilling basin repair — Spillway modification — Flip lip
Little Para Dam	Australia	— Flip/plunge pool rock protection
Beetaloo Dam	Australia	— Being considered for baffle blocks
Itaipu Dam	Brazil	— Cavitation-susceptible areas of some spillway slabs
Toutle Lake	USA	— Shotcrete lining for hydraulic tunnel through rock
Port Melon Dam	Canada	— Rebuild eroded spillway crest
Barr Lake Dam	USA	— Sloped upstream concrete face of embankment dam
Mississippi River Lock and Dam 2	USA	— Navigation lock floor

also torn loose. The repairs used a top layer of FRC over conventional fill concrete. Some surface erosion has occurred in the FRC, but it is minor when compared to damage in the original conventional concrete, and no repairs are needed.

Au barrage de Dworshak (USA), pour les importantes réparations d'une vidange et du bassin d'amortissement, endommagés par la cavitation et l'érosion, on a utilisé une combinaison de BAF et d'imprégnation de polymères dans le béton in situ. La cavitation était à l'origine des dégâts subis par l'ouvrage de vidange du réservoir, alors que les dégâts du bassin d'amortissement avaient surtout pour cause essentielle l'érosion due à des gros matériaux piégés, ferraille et graviers de rivière tourbillonnant à des vitesses très élevées. La réparation de ces ouvrages a été décrite en détail par le Comité des États-Unis des Grands Barrages [28] et Schrader et Kaden [25, 26]. Le BAF et les parties imprégnées de polymères ont donné toute satisfaction, bien que des inspections aient constaté de nouveaux dépôts de matériaux entraînés dans le bassin. Seules une légère usure aux joints et quelques empreintes provenant de morceaux de plaques et de barres d'acier piégés se sont produites. Près de 465 m² de l'ouvrage initial, ayant subi peu de dégâts, furent réparés avec du mortier d'époxy au lieu du BAF; cependant, le mortier époxy a presque entièrement cédé.

Au barrage de Tarbela (Pakistan), les bassins d'amortissement subirent de graves érosions, en 1974, lorsqu'une galerie d'évacuation de crue s'effondra juste à l'amont et que des débits élevés transportèrent à travers les bassins du béton et environ 459 000 m³ de matériaux rocheux. La rupture complète d'un des bassins réparés survint un an plus tard, des dalles entières de radier étant déplacées et un trou de 21 m de profondeur étant creusé dans le rocher. Les bassins furent réparés après plusieurs modifications de projet, incluant la mise en place d'ancrages en acier entre les dalles du radier et dans le rocher, un drainage sous-jacent de décompression et des caniveaux d'aération. Le nouveau béton fut recouvert d'une couche de BAF sur tout le radier. Quelques problèmes de production et de finition se sont posés au début des travaux, mais des modifications de la centrale à béton, l'acquisition d'outils appropriés et la formation des ouvriers chargés de la finition ont permis d'obtenir une exécution normale et le fini souhaité pour le béton. L'ensemble de cette réparation s'est depuis parfaitement comporté.

Pour éliminer la sursaturation en azote (cause de la mortalité des poissons) de l'eau passant sur l'évacuateur de crue, des déflecteurs horizontaux furent placés sur les évacuateurs de crue des barrages de Lower Monumental, Little Goose et McNary (Corps des Ingénieurs), le long des fleuves Snake et Columbia (USA). Les déflecteurs, constitués d'un béton classique recouvert d'une couche de BAF, se sont très bien comportés. Quelques-uns ont connu des écoulements records.

Comme on l'a indiqué ci-dessus, le bassin d'amortissement du barrage de Kinzua fut réparé avec du BAF, mais la réparation ne s'avéra pas satisfaisante. Le matériau en place est de qualité inférieure et n'est pas comparable à celui de l'étude. Il y eut des problèmes pendant toute la mise en œuvre. Des carottes révélèrent une faible résistance, un faible poids unitaire, de grandes poches d'air. Aucun essai de résistance à la fatigue, au choc ou essai de déformabilité n'a été fait au cours de l'étude.

Les barrages d'Alder et de Mayfield (USA) sont des ouvrages de grande hauteur, utilisant des bassins de réception pour la dissipation de l'énergie. Le béton dans les deux bassins subit des dégâts importants dus aux chocs et à l'érosion causés par les matériaux charriés. Chaque bassin fut réparé avec un revêtement de BAF, une partie du béton étant appliquée au moyen d'une pompe et une autre pneumatiquement (béton projeté). Peu de temps après l'achèvement des travaux, les bassins des deux barrages furent soumis aux débits de la crue cinquantennale et, en outre, à des charriages lourds consistant approximativement en 1 500 m³ de

At Dworshak Dam (U.S.A.) major repairs have been made to cavitation and erosion damage in an outlet and the stilling basin using a combination of FRC and polymer impregnation of in situ concrete. Damage to the outlet structure was caused by cavitation, whereas damage to the stilling basin was caused primarily by erosion brought about by the action of large pieces of trapped debris, scrap steel, and river gravels churning around at very high velocities. The repair has been reported in detail by USCOLD [28] and Schrader and Kaden [25, 26]. Both the FRC and polymer-impregnated portions of the project have performed exceptionally well even though inspections indicate debris has again been deposited and tumbled in the basin. Only minor wear at joints and some "gouge" marks from trapped scrap steel plates and bars have occurred. About 5 000 ft² (465 m²) of the original construction that had only minor damage was repaired with epoxy mortar instead of FRC; however, the epoxy mortar has failed almost entirely.

Stilling basins at Tarbela Dam (Pakistan) experienced severe erosion in 1974 when a spillway tunnel just upstream collapsed and heavy flows carried concrete and about 600 000 yd³ (459 000 m³) of rockfill material through the basin. Complete failure of one of the repaired basins occurred a year later when entire floor slabs were displaced and a 70 ft (21 m) deep hole was eroded in bedrock. The basins were subsequently repaired after several design changes were made including the installation of steel anchors between floor slabs and into the bedrock, pressure relief under-drainage, and air troughs. The new concrete was provided with a top layer of FRC over the entire floor. Some initial production and finishing problems occurred on this job, but appropriate modifications of the batch plant, acquisition of appropriate finishing tools, and training of the finishers resulted in the desired construction progress and concrete finish. This overall repair has since performed admirably.

To eliminate nitrogen supersaturation (and subsequent fish mortality) in water flowing over the spillway, horizontal deflectors have been placed on the spillways of the Corps of Engineers' Lower Monumental, Little Goose, and McNary Dams along the Snake and Columbia Rivers, USA. The deflectors which consist of conventional concrete with a top layer of FRC have performed very well. Some have been subjected to record flows.

As indicated previously, the Kinzua Dam stilling basin was repaired with FRC, but the repair has not proven to be satisfactory. Evaluation of the in-place material shows it to be of inferior quality and not comparable to the mix design. Problems were reported throughout the placement. Cores show low strength, low unit weight, and high void contents of entrained and entrapped air. No fatigue, impact, or strain capacity tests were made during the design stages.

Alder and Mayfield Dams (USA) are high-head structures utilizing plunge pools for energy dissipation. The concrete in the basins of both pools experienced major damage due to impact and erosion from debris present when they were in use. Each basin was repaired with a topping of FRC, some of the concrete being placed by a pump and some by shotcrete. Shortly after completion of repairs, the basins at both projects were subjected to 50-year design flood flows, and additional heavy loads of debris consisting of approximately 2 000 yd³ (1 500 m³) of gravels and rock as large as 1 yd³ (3/4 m³) washed from rock slopes above the pools. When

graviers et de rocher, dont la taille atteignait $3/4 \text{ m}^3$, détachés des pentes rocheuses au-dessus des bassins. Quand les bassins de réception furent asséchés pour en permettre l'examen, en avril 1978, on constata qu'au barrage d'Alder le radier coulé sur place n'avait subi aucune détérioration, mais qu'au barrage de Mayfield les dalles de 37,5 cm d'épaisseur s'étaient désolidarisées. Bien que le BAF fût en bon état, les dalles n'étaient pas liées en raison d'une mauvaise consolidation et l'ancrage n'était pas suffisant pour résister aux sous-pressions. L'usure des dalles était peu visible mais les joints de construction étaient affouillés. Les barres d'ancrage s'étaient amincies en leur milieu et n'avaient pu supporter les tractions. Dans quelques dalles, les armatures (barres n° 7) avaient disparu, laissant des trous lisses d'un diamètre de 25 mm dans les dalles; mais le BAF était toujours intact. En résumé, le BAF avait bien résisté aux forces de cavitation, de choc et d'érosion, mais une rupture par sous-pression avait été la conséquence d'un mauvais compactage (vibration) et d'un ancrage mécanique insuffisant.

Un trou relativement petit, qui constitua une amorce de cavitation dans le béton du rebord d'une des auges de déflexion du barrage de Lucky Peak (USA), fut réparé de façon simple mais convenable avec du BAF. Après plusieurs années d'utilisation, la réparation n'a pas bougé et l'auge de déflexion reste en service. Des réparations antérieures effectuées avec des plaques d'acier ancrées avaient échoué.

Le béton endommagé par les forces de cavitation et d'érosion dans les aqueducs de l'écluse de navigation de Lower Monumental (USA) fut réparé, en 1978, avec du BAF ancré dans le béton de base et recouvert de mortier d'époxy. Depuis, le BAF a donné satisfaction, mais le mortier d'époxy a été détérioré au bout de quelque douze mois de service.

L'évacuateur de crue de barrage d'Oxbow (USA), fut sapé et partiellement détruit par l'érosion résultant de l'action des vagues et de remous sévères et imprévus. En certains endroits, l'érosion s'étendait à travers le béton d'origine, jusqu'à 10 mètres dans la roche. Des réparations ont été faites, du BAF étant utilisé au-dessus du béton de remplissage dans la zone détériorée de l'évacuateur de crue.

Au barrage de Bonneville (USA), où l'on a ajouté une deuxième centrale électrique, le mortier à l'aval de la centrale a été revêtu de BAF, afin de le protéger contre l'érosion causée par les matériaux piégés.

En 1984, plus de $49\,960 \text{ m}^2$ de BAF, de 10 cm d'épaisseur, furent mis en place sur le parement amont du barrage de Barr Lake (USA) [17]. Le BAF a constitué un revêtement étanche et une protection de talus pour le barrage en remblai sableux. Le revêtement initial en béton, mis en place en 1909, armé d'un treillis métallique, qui présentait d'importantes fissures et déformations, fut enlevé et le BAF mis en place en 95 jours. Le mélange de BAF contenait des granulats, de dimension maximale 38 mm, et des fibres d'acier, de 50 mm de longueur. L'utilisation d'un ciment avec pouzzolanes, dosé à 306 kg/m^3 , donna une résistance moyenne à la compression de 21,7 MPa. La plus grande partie du BAF fut mise en place à la pompe sur un talus de 2,5 h/1v où il était maintenu en place pour un compactage sur toute son épaisseur au moyen d'un coffrage glissant auto-propulsé. Des pénétrateurs tenus à la main étaient introduits dans le BAF le long du bord avant du coffrage à mesure qu'il remontait la pente.

Au barrage le Little Goose (USA), on a utilisé du BAF au lieu du béton classique pour encastrier et protéger les boulons d'ancrage des rails de la grue, fixés à des poutres précontraintes enjambant les pertuis de l'évacuateur. On utilisa des

the plunge pools were unwatered for inspection in April 1978, it was found that the cast-in-place floor at Alder Dam had suffered no damage, but that the 15 in (37.5 cm) slabs at Mayfield Dam had been pulled loose. Although the FRC was in good condition, the slabs were not bonded due to poor consolidation, and anchorage was not sufficient to withstand the uplift pressures. The slabs showed little visible wear but were honeycombed on the construction joint. Anchor bars had necked down and failed in tension. In some instances, slab reinforcement consisting of No. 7 bars had worked out, leaving 1 in (25 mm) diameter smooth holes in the slabs, but the FRC was still intact. In summary, the FRC had resisted the forces of cavitation, impact, and erosion well, but poor consolidation (vibration) and insufficient mechanical anchorage had resulted in failure by uplift.

A relatively small hole that cavitated into concrete at one of the Lucky Peak Dam (USA) flip lips was repaired in a simple but expedient method with FRC. After several years of use, the repair is still intact and the flip lip is operational. Previous repairs with anchored steel plates failed.

Cavitation and erosion forces damaged the concrete in the culverts of the Lower Monumental navigation lock (USA). These were repaired in 1978 with FRC anchored to the base concrete and with epoxy mortar overlays. The FRC has performed well, but the epoxy mortar failed after approximately 1 year of service.

The spillway at Oxbow Dam (USA) was undercut and partially destroyed by erosion resulting from wave action and unpredicted severe eddy currents. In some areas, the erosion extended through the original concrete and approximately 30 ft (10 m) into the rock foundation. Repairs were made using FRC over fill concrete at the failed spillway surface.

At Bonneville Dam (USA), where a second powerhouse was added, an FRC overlay was used in the apron downstream of the powerhouse to protect it from erosion by trapped debris and rock.

In 1984, over 59 750 yd² (49 960 m²) of 4 in (10 cm) thick FRC was placed on the upstream face of Barr Lake Dam (USA) [17]. The FRC provided an impervious lining and slope protection for the sand embankment dam. The severely cracked and displaced wire-mesh-reinforced original concrete lining, constructed in 1909, was removed and the FRC placed in 95 days. The FRC mixture contained 1-1/2 in (38 mm) maximum size aggregate and 2 in (50 mm) long steel fiber. A cement plus pozzolan content of 517 lb/yd³ (306 kg/m³) was used and produced an average compressive strength of 3 146 lb/in² (21.7 MPa). The majority of FRC was pumped into place on the 2.5 horizontal to 1.0 vertical slope where it was held in position for full-depth consolidation by self-propelled slipform screed. Hand-held immersion vibrators were inserted in FRC along the leading edge of the screed as it moved upslope.

At Little Goose Dam (USA), FRC was used in lieu of conventional concrete to encase and protect crane rail anchor bolts attached to prestressed beams spanning the spillway bays. A marginal number of steel anchors were used to attach

ancrages en acier pour fixer les rails aux poutres. Le BAF assurait un encastrement des ancrages sans fissuration et sans crainte de corrosion à long terme.

Pour les réparations superficielles des murs des écluses de navigation, aux barrages de Lower Monumental et de Little Goose (USA), les propriétés du BAF, à l'état plastique et à l'état durci, ont été utilisées avec profit. On adopta du BAF avec du ciment de type III, dont la mise en place fut contrôlée de manière à obtenir une pression prédéterminée sur le coffrage, suffisante pour précontraindre, dans les limites de sécurité, les barres d'ancrage encastrées. Le BAF frais n'eut pour ainsi dire pas de support jusqu'à ce qu'il ait été pervibré. Il devenait alors fluide dans sa masse sur 1,5 m environ autour du pervibrateur. A l'intérieur de cette zone d'influence, le BAF fluide exerçait des pressions relativement fortes sur le coffrage; mais, au fur et à mesure que le béton mis en place s'élevait, la pression sur le coffrage, dans la masse au-dessous, se stabilisait à la charge désirée et restait relativement constante, n'étant apparemment pas influencée par la mise en place du béton au-dessus. Les appareils de mesure et l'observation de carottes indiquent que les pièces de BAF précontraintes sont maintenues fermement en place, sans relaxation ou séparation du béton de base. Du fait de l'amélioration de ses résistances au cisaillement et à la traction, le BAF ne nécessitait pas d'armatures classiques et il s'est très bien comporté dans les zones où le béton initial fut endommagé.

Au barrage de Karun (Iran), une forte cavitation localisée et étendue se produisit sur les évacuateurs de crue de haute chute. Diverses réparations furent tentées pour corriger les défauts de tolérance et de qualité présentés par la construction d'origine en béton classique. Des centaines de petites réparations et chapes en BAF furent exécutées et se sont bien comportées. Des chapes d'époxy furent aussi mises en place mais n'ont généralement pas tenu.

Le béton projeté armé de fibres a été utilisé en tant que méthode efficace et économique de revêtement de soutènement de galerie d'accès et pour la stabilisation de talus rocheux. Au barrage de Ririe (USA), le béton projeté armé de fibres fut adopté pour revêtir une galerie d'accès creusée à travers des zones de silt, des couches de cendres, de la rhyolite et des blocs dans un appui basaltique. Le revêtement de béton projeté donna toute satisfaction pendant les travaux à l'explosif utilisés pour excaver les matériaux sur la surface de l'appui.

Sur l'aménagement de Little Goose, du béton projeté armé de fibres et des boulons d'ancrage furent utilisés pour stabiliser les talus, le long de l'excavation d'un chemin de fer dans du basalte se desquamant, ces travaux faisant partie de l'aménagement du barrage. La zone avait une longueur de 472 m et une hauteur variant de 4,5 m à 14 m. Des boulons d'ancrage furent mis en place et on procéda ensuite à une application de béton projeté. L'entrepreneur pouvait opter entre l'emploi de 64 mm de béton projeté avec fibres ou de 51 mm de béton projeté classique sur treillis métallique fixé au rocher. Il choisit le béton avec fibres comme étant d'exécution plus rapide, plus facile et plus économique. Le béton projeté est en place depuis 1972 environ et présente un très bon comportement.

Une application particulière de béton armé de fibres a été réalisée à l'écluse de navigation de Lower Monumental (USA); sur les parois des murs de l'écluse, le béton était détérioré en raison de son exposition à des cycles de gel et de dégel sévères et d'une mauvaise répartition de l'air occlus dans le béton. Un matériau de protection de surface pouvant être appliqué rapidement était nécessaire (une grande épaisseur n'étant pas requise). Il devait empêcher l'humidité de saturer de

the rails to the beams. FRC was used to provide a crack-free encasement of the anchorages without fear of long-term corrosion.

Both the plastic and hardened material properties of FRC have been utilized to advantage in navigation lock wall surface repairs at the Lower Monumental and Little Goose Dams (USA). FRC with type III cement was used at a controlled placement rate that provided a predetermined form pressure sufficient to prestress embedded anchor bars within safe limits. The FRC was essentially self-supporting in its fresh state until it was subjected to internal vibration. Then it became "fluid" within about 5 ft (1.5 m) of the vibrator. Within this zone of influence, the fluidity of FRC exerted relatively high form pressures, but as the placement progressed upward, form pressures in the mass below stabilized at the desired load and remained relatively constant, apparently uninfluenced by the placement above. Instrumentation and observation of cores show that the prestressed FRC patches are being tightly held in place without relaxation or separation from the base concrete. Because of its improved shear and tensile strengths, the FRC did not require conventional reinforcing bars, and it has performed very well where the previous concrete failed.

At Karun Dam (Iran), severe localized and widespread cavitation occurred in the high-head spillways. A variety of repair efforts was used to correct defects in tolerances and quality of original conventional concrete construction. Hundreds of small repairs and patches with FRC were made and have performed well. Epoxy patches were also made, but they failed routinely.

Fiber reinforced shotcrete has been used as an effective and economical method of support for adit linings and for rock slope stabilization. At Ririe Dam (USA), fiber reinforced shotcrete was used to line an adit driven through zones of silt, ash beds, rhyolite, and boulders into a basalt abutment. The shotcrete lining performed satisfactorily throughout blasting activities to excavate material at the abutment face.

At the Little Goose project, fiber reinforced shotcrete with rock bolts was used for slope stabilization along a railroad excavation in scaling basalt rock that was part of the dam project. The area was 1 550 ft (472 m) long and varied from 15 to 45 ft (4.5 to 14 m) high. Rock bolts were installed followed by shotcreting. The contractor had an option of using 2-1/2 in (64 mm) of fibrous shotcrete or 2 in (51 mm) of conventional shotcrete over wire mesh pinned at the rock. He selected the fiber alternative as faster, easier, and more economical. The shotcrete has been in place since about 1972 and has performed extremely well.

A specialized use of fibrous reinforcement has been made at the Lower Monumental navigation lock (USA). Concrete at the surface of the lock wall was deteriorating due to severe exposure to freezing and thawing cycles and an inadequate entrained air void system in the concrete. A surface protective material was needed that could be rapidly applied, did not require much thickness, would prevent moisture from critically saturating the concrete when subjected to pressures

façon dangereuse le béton, quand il est soumis à des charges de 30 m d'eau; il devait résister aux chocs des péniches et bateaux, avoir une résistance et une déformabilité élevées à la traction, se lier parfaitement au béton de base et résister à la détérioration lorsqu'il est exposé aux cycles d'humidification/séchage et de gel/dégel. Différents matériaux ont été étudiés à l'aide d'essais approfondis en laboratoire et furent essayés in situ. Un ciment Portland, un béton projeté armé de fibres de verre, modifié avec du latex, donnèrent satisfaction in situ et en laboratoire. La perméabilité du matériau de réparation fut négligeable et on obtint des résistances de l'ordre de 10 MPa en traction simple et de 2 MPa en flexion. Le matériau était rapidement appliqué à l'aide d'un procédé spécial qui projette le mortier pré-malaxé et qui, simultanément, hache et expulse les fibres de verre. Le revêtement s'est bien comporté pendant 5 années environ, au bout desquelles l'humidité piégée sous le revêtement étanche a saturé le béton d'origine sous la surface de séparation et l'a détérioré par suite du gel. Le revêtement lui-même, soumis aux chocs des péniches, à des conditions climatiques sévères, etc., ne fut pas endommagé.

5 — CONCEPTION ET MÉTHODES DE CONSTRUCTION

Des procédés d'étude fondamentaux pour des utilisations classiques du BAF, tels que pour des dalles sur pentes et des poutres, ont été mis au point. Des exemples sont donnés dans les références [4, 18, 19, 22]. Cependant, comme pour le béton classique, les utilisations habituelles du BAF dans les barrages, en des endroits sujets à cavitation, et d'autres utilisations plus exceptionnelles s'appuient, pour une large part, sur la compétence et l'expérience du projeteur et sa connaissance du matériau. Les estimations des forces de sous-pressions et les hypothèses relatives au comportement hydraulique peuvent donner des indications sur les charges applicables. Les formules utilisées pour le béton classique peuvent être également appliquées au BAF, mais les valeurs réelles mesurées pour le cisaillement, la déformation, la longévité, la résistance à la traction, la résistance des liaisons, etc... doivent être utilisées au lieu d'être considérées comme fonction de la résistance à la compression; si la dernière méthode est utilisée, un grand nombre des effets avantageux du BAF, qui normalement ne sont pas reliés à la résistance à la compression, sont perdus. Aussi, là où cela est possible, des études comparatives doivent-elles tenir compte de la dureté, de la malléabilité, de la résistance au choc et à la fatigue, facteurs souvent importants quant à la performance et à la longévité, mais souvent négligés. Le Comité du BAF de l'Institut Américain du Béton (ACI) prépare un rapport d'étude qui n'est pas encore disponible.

Un paramètre clé auquel on n'a pas porté suffisamment d'attention dans certains cas est l'ancrage, au matériau de base, d'une dalle, d'une couche de recouvrement ou d'une chape de BAF. Comme dans le cas des revêtements en béton classique, les ancrages doivent être capables de résister à une sous-pression totale combinaison 1) d'une sous-pression agissant entre le béton avec fibres et le matériau de base sur lequel il repose et 2) d'une pression négative à la surface du béton avec fibres. Les ancrages doivent également être capables de répartir leurs charges par des liaisons ou des extrémités de barres recourbées. Le « cône » de béton affecté par l'ancrage dans le matériau avec fibres doit aussi avoir une

of 100 ft (30 m) of head, would be resistant to the impact of barges and boats, had high tensile strain capacity and strength, would bond well to the base concrete, and would be resistant to deterioration when exposed to wetting/drying and freezing/thawing cycles. Various materials were investigated in extensive laboratory tests and were applied in field prototype test areas. A portland cement, fiberglass reinforced shotcrete modified with a saran latex was found to perform satisfactorily in the prototype and laboratory testing. Permeability of the repair material was negligible, and strengths were on the order of 1 500 lb/in² (10 MPa) direct tension and 300 lb/in² (2 MPa) in flexure. The material was rapidly applied by a special procedure that sprays out the premixed mortar while simultaneously chopping and blowing out fiberglass fibers. The coating performed very well for about 5 years, at which time moisture trapped under the impervious coating saturated the original concrete below the interface and caused it to fail when subjected to freezing. The coating itself was undamaged by the impact of barge traffic, exposure to severe weather, etc.

5 — DESIGN CONCEPTS AND CONSTRUCTION METHODS

Basic design procedures for conventional uses of fiber reinforced concrete (FRC), such as in slabs on grade and in beams, have been developed. Some examples are given in the references [4,18,19,22]. However, as with conventional concrete, typical uses of FRC in dams for areas subjected to cavitation and for other less familiar applications have relied to a large extent on engineering judgment and experience, and the designer's familiarity with the material. Applied loading can be based on computations made for uplift forces and assumptions for hydraulic behavior. Design formulas used for conventional concrete can be used for FRC, but actual measured values for shear, strain, fatigue life, tensile strength, bond stress, etc., should be used instead of assuming them to be some function of compressive strength. When the latter method is used, many of the beneficial effects of FRC which do not normally follow the same relationships to compressive strength as does conventional concrete are lost. Also, where applicable, comparative designs should take into account toughness, ductility, impact resistance, and fatigue strength, which are often important but ignored factors that relate to performance and service life. The American Concrete Institute's Committee on FRC is preparing a design report, but it is not yet available.

One key design parameter that has not been given sufficient attention in some cases is anchorage of an FRC topping slab, overlay, or patch to the base material. As is the case with conventional concrete overlays, the anchors must be capable of resisting total uplift which is a composite of (1) uplift pressure between the fibrous concrete and the base material on which it is resting, and (2) negative pressure or uplift at the surface of the fibrous concrete. The anchors must also be able to distribute their load to the patch material through bond or bent bar ends. The "cone" of concrete affected by the anchor in the fibrous material must also have sufficient shear strength to transfer the maximum load to the surrounding

résistance au cisaillement suffisante pour transférer la charge maximale au béton qui l'entoure. Une autre méthode d'ancrage peut être obtenue en utilisant un agent de liaison entre la couche de recouvrement et la dalle de base, mais l'expérience a montré qu'une liaison satisfaisante était difficile à garantir dans de telles applications in situ. La liaison du BAF avec le béton de base sera identique à celle du béton classique présentant les mêmes compositions en ciment, en granulats fins, le même rapport eau/ciment, des conditions de mise en place identiques. En d'autres termes, un joint de construction parfaitement nettoyé et une vibration, sur toute son épaisseur, du béton mis en place sur le joint de construction sont nécessaires pour obtenir une liaison aussi bonne que dans le cas du béton classique. L'utilisation d'un agent de liaison, tel que l'époxy, peut créer une mince zone de matériau différent, constituant un plan de rupture potentielle. L'utilisation de trous de drainage pratiqués entre la couche de recouvrement et le matériau de base doit aussi être prise en considération pour réduire les forces de sous-pression.

Les méthodes et procédures d'exécution des travaux doivent être étudiées, pendant la phase des études, afin que des précautions appropriées concernant les coffrages ancrés, les coffrages glissants et les coffrages de soutènement provisoires soient prises pendant la construction. Elles comprennent la mise en œuvre d'ancrage approprié et de procédés pour le réglage des coffrages, ainsi que la mise au point de techniques pour obturer convenablement les trous de fixation des coffrages. Le BAF placé sur des pentes raides peut être provisoirement maintenu en place par des coffrages glissants pour permettre un compactage complet, sur toute son épaisseur, ou bien il peut être mis en place au moyen d'un profileur vibrant ayant derrière une plaque mobile isolée des vibrations. Les profileurs vibrants classiques, à haute fréquence et basse amplitude, conviennent pour la mise en place du BAF sur des surfaces horizontales ou en pente douce.

6 – MATÉRIAUX ET DOSAGES

En pratique, le BAF utilisé dans les travaux de barrage a normalement une teneur volumique en fibres de 0,5 à 1,2 %. Des concentrations plus fortes de fibres sont obtenues par le procédé dit « projection » de fibres de verre, par lequel des couches minces, riches en ciment, sont réalisées par une technique spéciale décrite dans le chapitre 7 « Gâchage, malaxage, transport et mise en place ». Une teneur volumique en fibres d'au moins 0,5 % est indispensable pour obtenir des effets bénéfiques significatifs; par contre, des concentrations au-dessus de 1,2 % environ deviennent difficiles à malaxer ou à manier. Pour des pourcentages plus élevés, les fibres peuvent s'entremêler et former des agglomérats ou des boules et le béton n'est plus maniable. De plus, à ces concentrations plus élevées, les coûts peuvent augmenter sensiblement, sans augmentation proportionnelle des avantages. En général, quand on utilise des fibres d'acier droites et lisses, les teneurs optimales en fibres sont : 1,5 à 2 % pour les pâtes de ciment, 1,5 % pour les mortiers, 1,2 % pour un mélange avec granulats d'une taille maximale de 9,5 mm, 1 % pour un mélange avec granulats de 38 mm. Quand des fibres constituées de fils déformés de haute résistance sont utilisées, la concentration en fibres peut généralement être réduite de 25 à 40 % sans perte de propriétés du matériau après prise. Les bétons de masse avec gros granulats ne sont pas adaptés au BAF et seraient coûteux. Une méthode

concrete. Another method of anchorage is by use of a bonding agent between the overlay and the base slab, but experience has shown that achieving satisfactory bond is difficult to guarantee in such field applications. Bond of the fiber concrete mix to the base concrete will be the same as would be achieved for a conventional concrete of similar cement content, fine aggregate content, water-to-cement ratio, and placing conditions. In other words, good construction joint cleanup and full-depth vibration of concrete placed on the construction joint are necessary to achieve bond of FRC as well as conventional concrete. The use of a surface bonding agent such as epoxy could actually create a thin zone of dissimilar material which is a potential failure plane. Use of relief drain holes installed through the contact between the overlay and the base material should also be considered for reduction of uplift forces.

Methods and procedures for doing the work must be considered during the design stage so that adequate precautions regarding anchored formwork, slipforms, and temporary holding forms are taken during construction. These include providing adequate anchorage and methods for form adjustments and developing techniques for properly patching form support holes. FRC placed on steep slopes can be temporarily held in position by formwork for thorough, full-depth consolidation, or it may be placed with a vibrating screed having a traveling plate behind it isolated from the screed vibrator. Conventional vibratory screeds with a high frequency and low amplitude are satisfactory for fibrous concrete placements on flat or gentle slopes.

6 — MATERIALS AND PROPORTIONING

The fiber content of practical mixes used in dam work normally constitutes about 0.5 to 1.2 percent of the concrete volume. A higher concentration of fiber is achieved with the fiberglass "spray-up" process where cement-rich, thin sections are made by a special technique described in Chapter 7 on Batching, Mixing, Transporting, and Placing. Typical FRC requires at least 0.5 percent by volume of fiber content in order to gain significant beneficial effects, while concentrations in excess of about 1.2 percent cause difficulty in mixing or handling. At higher percentages, the fibers can tangle into clumps or balls, and the concrete becomes unmanageable. Also, at higher concentrations, costs can increase significantly without a proportionate increase in benefits. In general, when straight, smooth steel fibers are used, optimum fiber contents are 1.5 to 2.0 percent for cement pastes, 1.5 percent for mortars, 1.2 percent for 3/8 in (9.5 mm) maximum aggregate size mixtures, 1.0 percent for 3/4 in (19 mm) aggregate mixtures, and 0.8 percent for 1-1/2 in (38 mm) aggregate mixtures. When fibers made with high-strength deformed wire are used, the fiber concentration can usually be reduced by about 25 to 40 percent without loss of hardened material properties. Mass concrete mixes with large aggregate are not suited for FRC and would be uneconomical. A "rule of thumb" in fiber selection is that the fiber should be at least as long as the maximum nominal aggregate size in the mix [6, 27].

empirique utilisée dans la sélection des fibres indique que la longueur des fibres doit être au moins égale à la taille nominale maximale des granulats dans le mélange [6, 27].

Les fibres d'acier commercialement disponibles dans le monde sont de tailles et formes différentes; elles sont fabriquées avec des matériaux de qualités différentes et selon différentes méthodes. Quelle que soit la méthode de fabrication, si la fibre n'est pas suffisamment rigide (rapport longueur/diamètre), elle aura tendance à plier et à s'agglomérer dans le mélange. Un rapport d'environ 80 à 100 est le maximum à utiliser dans la pratique. Si le rapport est trop faible et si des précautions ne sont pas prises pour améliorer la liaison, la longueur de fibre est insuffisante pour un ancrage approprié. Une méthode facile de fabrication consiste à couper un fil continu à la bonne longueur. Cependant, le fil ayant une grande résistance mais une surface lisse, il en résulte une fibre inefficace qui n'assure pas une liaison suffisante pour utiliser pleinement la résistance de la fibre. Le défaut de ces fibres est qu'habituellement elles sortent de la matrice qui les entoure. D'autres procédés de fabrication de fibres font appel :

- à la trempe à l'air de « particules » métalliques en fusion afin d'obtenir des fibres solides ayant une surface relativement rugueuse;
- au plissage, de telle sorte que le fil présente des déformations sur toute la longueur;
- au découpage de feuilles plates d'acier en fibres de petite section transversale rectangulaire;
- au pressage des fibres en forme d'haltère ou ayant une extrémité élargie;
- au pliage de l'extrémité du fil coupé pour permettre l'ancrage à l'extrémité.

Chaque procédé donne des fibres de caractéristiques et de coûts différents. Les fibres trempées peuvent avoir une meilleure résistance à l'extraction et être plus économiques à la production, mais elles sont également plus cassantes et leurs propriétés sont moins constantes à moins que des méthodes spéciales de contrôle de qualité ne soient appliquées pendant la fabrication. Des fibres plissées sont coûteuses, mais ont à l'extraction une résistance améliorée. Des fibres découpées ont une plus faible résistance à la traction, mais sont plus faciles à manipuler que du fil coupé. Des bouts élargis ou courbés donnent une fibre plus efficace, spécialement pour du fil à haute résistance, à cause de l'ancrage à l'extrémité, mais cette opération supplémentaire dans la fabrication augmente les coûts.

De même que les différents types de fibres ont des caractéristiques différentes, les bétons produits avec ces fibres auront aussi des propriétés différentes. Quand on procède à la mise au point d'un BAF, on doit tenir compte du type de fibre utilisé et des modes d'application du béton. Une fibre cassante avec de bonnes caractéristiques de liaison produira du béton de moindre dureté, avec une résistance au choc et une capacité de déformation inférieures, mais d'une plus grande résistance finale à la traction que du béton fabriqué avec une fibre d'une plus grande résistance ayant de médiocres qualités de liaison. Les fibres qui n'ont pas d'ancrage au bout s'arracheront et auront une capacité de charge constamment décroissante et une flèche croissante peu après la « première fissure ». Les fibres à haute résistance avec un ancrage au bout peuvent, en fait, atteindre un point où la capacité de charge commence à s'abaisser avec une flèche croissante, puis augmente de nouveau avec une flèche permanente. La dureté et la résistance au choc qui en résultent pour ce dernier type de fibre seront élevées, mais sa résistance à la « première fissure » peut être inférieure. Quelques-unes des fibres les plus

Steel fibers commercially available around the world are made in different sizes and shapes, of different quality materials, and by different production methods. Regardless of the method of manufacture, if the fiber is not stiff enough (“aspect ratio” or length-to-diameter ratio), it will tend to bend and tangle into clumps in the mix. An aspect ratio in the range of about 80 to 100 is a practical maximum. If the aspect ratio is too low and provisions to improve bond are not made, there is insufficient fiber length for adequate anchorage. An easy method of production is to cut continuous wire to the appropriate length. Since wire has inherently high strength but a smooth surface, this results in an inefficient fiber that does not develop sufficient bond to utilize the full strength of the fiber. These fibers usually fail by pulling out of the surrounding matrix. Other methods of producing or improving fibers include:

- Quenching a “spit” of molten metal in the air so that it drops out as a solid fiber with a relatively rough surface;
- Crimping wire so that it has deformations along its length;
- Shearing flat sheets of steel into fibers of small rectangular cross section;
- Squeezing a “dumbbell” shape or enlarged end into the fibers; and
- Bending the end of a sheared wire to provide end anchorage.

Each process produces a fiber having different characteristics and supply costs. Quenched fibers may have better resistance to pullout and be more economical to produce, but they can also be more brittle and have less consistency in properties unless special quality control procedures are followed during the manufacturing process. Crimped fibers are expensive but have improved pullout resistance. Sheared fibers have lower tensile strength but are easier to handle than chopped wire. Enlarged or bent ends provide a more efficient fiber (especially for high-strength wire) due to the end anchorage, but this extra production step increases costs.

Just as the different fiber types have different characteristics, concretes made with these fibers will have different properties. When developing an FRC mixture design, the fiber type and the application of the concrete must be considered. A brittle fiber with good bond characteristics will produce concrete with less toughness, impact resistance, and strain capacity but higher ultimate tensile strength than concrete with higher strength fiber having poor bond characteristics. Fibers that have no end anchorage will pull out and have a constantly decreasing load-carrying capability with increasing deflection soon after “first crack” is reached. Fibers with high strength and end anchorage may actually reach a point where the load-carrying capability begins to drop off with increasing deflection and then increases again with continued deflection. The resulting toughness and impact resistance for this latter type will be high, but its “first crack” strength may be lower. Some of the more efficient fibers, such as those made with high-strength wire and bent ends or the highly deformed corrugated type of strong flat fiber, can

efficaces, telles que celles constituées de fil à haute résistance et à bouts courbés, ou les fibres plates, résistantes, fortement plissées, peuvent présenter une résistance au choc et d'autres propriétés plus grandes que les fibres lisses, rectilignes, même pour des concentrations de fibres nettement inférieures.

Comme pour le béton classique, la qualité des granulats et leur granulométrie affectent de façon significative la résistance et la performance du béton avec fibres. Des granulats d'excellente qualité s'imposent quand le BAF est utilisé en milieu défavorable, ce qui est habituellement le cas, ou qu'une grande résistance est demandée. L'amélioration des propriétés du mortier ajoutera peu aux propriétés du béton si on utilise des granulats de mauvaise qualité, de faible résistance. Les fibres ne peuvent presque rien pour améliorer la qualité d'un béton contenant un granulats médiocre.

Comme pour le béton classique, la dimension, la forme et le dosage des granulats influencent la qualité du BAF. De gros granulats de taille maximale de 18 à 25 mm sont d'habitude utilisés pour le BAF. Dans les premières réalisations, des granulats plus petits ont été adoptés, mais la tendance actuelle est d'utiliser des granulats plus gros. Comme indiqué précédemment, des granulats plus gros nécessitent habituellement moins de fibres. Des couches minces, d'une épaisseur inférieure à 8 cm environ, demandent des granulats de plus petite dimension.

La forme des plus gros granulats a un effet significatif sur les propriétés du matériau, notamment sur la maniabilité. Les plus gros granulats concassés donnent une plus grande capacité de résistance et de déformation à la traction [12]. Du fait de la forte teneur en sable habituellement utilisée avec le BAF, la rudesse ordinairement attribuée au béton frais à granulats grossiers concassés est moindre que celle présentée normalement par le béton classique.

Les teneurs en granulats fins dans le BAF sont habituellement de 45 à 55 % de la teneur totale en granulats. L'expérience a démontré que les mélanges utilisant du sable fin de rivière, composé de grains de forme arrondie, donnaient un béton plus maniable que les mélanges avec sables concassés. Également un léger excédent de matériaux passant aux tamis n° 30 (0,595 mm) à n° 50 (0,297 mm) environ, améliorent généralement la maniabilité et l'efficacité du malaxage. Le béton doit contenir suffisamment de mortier pour séparer les gros granulats afin que les fibres puissent s'écouler entre eux sans s'emmêler. Comme pour le béton classique, les granulats doivent être uniformément classés, de la plus grande à la plus petite dimension, sauf comme il est mentionné ci-dessus à propos des matériaux correspondant au tamis n° 30 environ. Les Tableaux 3 et 4 indiquent les granulométries jugées satisfaisantes pour le BAF. Les plages de granulométries suggérées pour des stocks séparés de groupes de granulats de diverses dimensions maximales sont données à titre de recommandations. Cependant, la granulométrie totale, résultant de la combinaison de granulats pour les dosages adoptés dans le projet de mélange, constituera le critère de contrôle.

Les teneurs en ciment sont ordinairement plus élevées pour le BAF que pour les mélanges classiques; elles varient de 325 à 415 kg de ciment par mètre cube, pour un granulats de 19 mm; elles sont quelquefois plus élevées avec un granulats plus petit. Si on le juge utile, une pouzzolane appropriée peut être utilisée en remplacement d'une partie du ciment Portland. Il en résulte une amélioration de la plasticité, un abaissement de la chaleur d'hydratation et habituellement une réduction de coût pour le BAF. Les résistances à 3, 7 et 28 jours seront inférieures à celles du béton n'utilisant aucun liant de substitution, mais les résistances à 90

develop higher impact resistance and other properties than smooth, straight fibers, even at substantially lower fiber concentrations.

As with conventional concrete, aggregate quality and gradation significantly affect the strength and performance of fibrous concrete. Because FRC is normally used in adverse environments or where special properties are needed, it usually requires high-quality aggregate. Improving the properties of the cementing matrix will add little to the concrete properties if poor-quality, low-strength aggregate is used. The fibers can do little to improve the quality of concrete containing poor aggregate.

As with conventional concrete, aggregate size, shape, and content influence the quality of FRC. Coarse aggregates having maximum sizes of 3/4 to 1 in (18 to 25 mm) are commonly used with FRC. Earlier work used smaller aggregate, and the current trend is to use larger aggregate. As discussed earlier, larger aggregate sizes usually require less fiber. Smaller sections less than about 3 in (8 cm) in thickness should be considered as requiring a smaller aggregate size.

The coarse aggregate particle shape has a significant effect on workability and material properties. Crushed coarse aggregate results in higher strength and tensile strain capacity [12]. Because a high sand content is normally used with FRC, the harshness usually attributed to fresh concrete with crushed coarse aggregate is less than normally expected in conventional concrete.

Fine aggregate contents for FRC mixes typically are 45 to 55 percent of the total aggregate content. Experience has shown that mixes utilizing fine river sand with a rounded particle shape provide more workable concrete than mixtures with manufactured sands. Also, a slight excess of material at about the No. 30 (0.595 mm) to No. 50 (0.297 mm) sieve size results in a general improvement in workability and mixing efficiency. The concrete must contain sufficient mortar to separate the coarse aggregate particles so that the fibers can flow between them without tangling together. As in conventional concrete, aggregates should be uniformly graded from the largest to smallest size except as noted with regard to material at about the No. 30 sieve. Tables 3 and 4 present gradations that have been found to be satisfactory for FRC. Suggested approximate gradation ranges for individual separate stockpiles of various maximum aggregate size groups are shown as a guide. However, the total gradation resulting from the combination of aggregates at the batch proportions used in the mix design should be the controlling criterion.

Cement factors are usually higher for FRC than conventional mixes. Typical cement factors range from 550 to 700 pounds of cement per cubic yard (325 to 415 kg/m³) for 3/4 in (19 mm) aggregate and sometimes higher for smaller aggregate. When practical, an appropriate pozzolan should be used as a replacement for a portion of the portland cement. This improves the plasticity, lowers the heat of hydration, and usually results in cost savings for the usually richer FRC. Early strength, at ages of 3, 7, and 28 days, will be lower than for concrete utilizing no

TABLEAU 3
Granulométries des stocks individuels recommandées
pour les granulats du béton armé de fibres d'acier (BAF)
(% passant au tamis)

Tamis No.	Granulats fins	Granulats de 9,5 mm	Granulats de 19,0 mm	Granulats de 38,1 mm
2 (50,8 mm)				100
3/2 (38,1 mm)				90-100
1 (25,4 mm)			100	35-65
3/4 (19,0 mm)			90-100	2-20
1/2 (12,7 mm)		100	35-75	0-15
3/8 (9,5 mm)	100	90-100	20-45	0-5
4 (4,8 mm)	95-100	45-70	0-5	
8 (2,4 mm)	80-95	10-20		
16 (1,2 mm)	60-80	0-5		
30 (0,60 mm)	35-65			
50 (0,30 mm)	20-60			
100 (0,15 mm)	5-12			
200 (0,08 mm)	0-2			

TABLEAU 4
Granulométries totales recommandées
pour le béton armé de fibres d'acier
(% passant au tamis)

Tamis No.	9,5 mm	12,7 mm	19,0 mm	25,4 mm	38,1 mm
2 (50,8 mm)					100
3/2 (38,1 mm)				100	90-100
1 (25,4 mm)			100	92-100	68-86
3/4 (19,0 mm)		100	93-100	76-89	58-76
1/2 (12,7 mm)	100	93-100	74-89	65-76	50-65
3/8 (9,5 mm)	96-100	73-89	61-75	56-66	46-58
4 (4,8 mm)	72-84	53-66	48-56	45-53	38-48
8 (2,4 mm)	46-57	42-52	40-48	36-45	31-42
16 (1,2 mm)	34-44	33-41	32-40	29-37	23-35
30 (0,6 mm)	22-33	21-31	20-30	18-29	16-28
50 (0,3 mm)	10-19	10-18	9-18	8-18	7-17
100 (0,15 mm)	3-8	3-8	3-8	2-8	2-7
200 (0,08 mm)	0-2	0-2	0-2	0-1	0-1

Remarque : Les granulats doivent être bien classés depuis le plus gros jusqu'au plus fin. Le granulat ne devra presque pas présenter de variations entre le pourcentage maximal admissible passant à un tamis et le pourcentage minimal admissible passant au tamis le plus proche.

TABLE 3
Recommended Individual Stockpile Gradations
for Steel Fiber Reinforced Concrete (FRC) Aggregates
(% Passing)

<i>Sieve No.</i>	<i>Fine Agg.</i>	<i>3/8 in Agg. 9.5 mm</i>	<i>3/4 in Agg. 19 mm</i>	<i>3/2 in Agg. 38 mm</i>
2 (50.8 mm)				100
3/2 (38.1 mm)				90-100
1 (25.4 mm)			100	35-65
3/4 (19.0 mm)			90-100	2-20
1/2 (12.7 mm)		100	35-75	0-15
3/8 (9.5 mm)	100	90-100	20-45	0-5
4 (4.8 mm)	95-100	45-70	0-5	
8 (2.4 mm)	80-95	10-20		
16 (1.2 mm)	60-80	0-5		
30 (0.60 mm)	35-65			
50 (0.30 mm)	20-60			
100 (0.15 mm)	5-12			
200 (0.08 mm)	0-2			

TABLE 4
Recommended Total Gradations
for Steel Fiber Reinforced Concrete
(% Passing)

<i>Sieve No.</i>	<i>3/8 in</i>	<i>1/2 in</i>	<i>3/4 in</i>	<i>1 in</i>	<i>3/2 in</i>
2 (50.8 mm)					100
3/2 (38.1 mm)				100	90-100
1 (25.4 mm)			100	92-100	68-86
3/4 (19.0 mm)		100	93-100	76-89	58-76
1/2 (12.7 mm)	100	93-100	74-89	65-76	50-65
3/8 (9.5 mm)	96-100	73-89	61-75	56-66	46-58
4 (4.8 mm)	72-84	53-66	48-56	45-53	38-48
8 (2.4 mm)	46-57	42-52	40-48	36-45	31-42
16 (1.2 mm)	34-44	33-41	32-40	29-37	23-35
30 (0.6 mm)	22-33	21-31	20-30	18-29	16-28
50 (0.3 mm)	10-19	10-18	9-18	8-18	7-17
100 (0.15 mm)	3-8	3-8	3-8	2-8	2-7
200 (0.08 mm)	0-2	0-2	0-2	0-1	0-1

Note : Aggregates should be well graded from the largest to the smallest size. Aggregate shall not vary from near the maximum allowable percent passing one sieve to near the least allowable percent passing the next sieve size.

jours et plus seront égales ou plus élevées que celles des bétons utilisant du ciment Portland pur.

Les adjuvants sont une partie importante de n'importe quel béton, y compris le BAF. On sait depuis longtemps que la résistance au gel et au dégel et la maniabilité sont liées à la teneur en air occlus. On doit adopter les teneurs en air occlus normalement recommandées car, comme pour le béton classique, des teneurs en air occlus anormalement élevées peuvent affecter défavorablement la résistance à la compression du BAF et des teneurs anormalement basses affectent défavorablement la résistance au gel/dégel.

Les adjuvants réducteurs d'eau ont aussi des effets retardateurs de prise et habituellement facilitent la manipulation du BAF sur le chantier. Il est recommandé que, compte tenu des dosages importants de ciment généralement utilisés pour le BAF, la quantité d'adjuvant réducteur d'eau soit maintenue à un niveau inférieur à celui recommandé pour le béton classique. En plus des économies réalisées, une quantité moins importante d'adjuvant réducteur d'eau paraît réduire de manière intéressante la perte de maniabilité.

Les rapports eau/ciment utilisés dans le BAF doivent faire l'objet d'une attention particulière. La tendance à augmenter la teneur en eau, qui élimine certaines des propriétés avantageuses attendues de l'addition des fibres, doit être évitée. Dans le BAF, des rapports eau/ciment variant de 0,41 à 0,48 sont habituels. Les applications à des structures spéciales, notamment le pavage, se traduisent par des rapports E/C plus faibles (0,38 à 0,44), mais il en résulte plus de difficultés de mise en place. A la limite supérieure de la fourchette E/C, les essais montrent qu'il arrive un moment où l'affaissement (slump) continue à croître avec la teneur en eau mais que l'ouvrabilité, sous l'effet des vibrations, n'est plus améliorée. La qualité du béton baisse alors d'une manière significative sans avantage pour l'ouvrabilité. Comme on l'a indiqué antérieurement, tous ceux qui sont concernés par l'utilisation du BAF doivent prendre connaissance des propriétés d'ouvrabilité du béton soumis à des vibrations et éviter des additions inutiles d'eau de malaxage basées uniquement sur l'apparence.

7 — GÂCHAGE, MALAXAGE, TRANSPORT, MISE EN PLACE

Deux vastes domaines sont à prendre en considération, en vue de l'utilisation satisfaisante du BAF :

- 1) Résistance et propriétés de base propres à satisfaire les exigences de la conception de la structure,
- 2) Conditions d'exécution, comprenant le malaxage, le transport, la mise en place et la finition.

La réussite du malaxage et de la manutention du BAF dépend de nombreux et importants facteurs. Chaque mélange doit être traité à part, afin d'obtenir, pour les travaux spécifiques envisagés, un béton maniable dont la teneur en eau, le retrait, la perte d'affaissement (slump) et le ressuage sont faibles.

Il importe de veiller à une introduction convenable des fibres dans le mélange afin d'obtenir un béton sans boules de fibres, à des coûts de production raisonnables. De nombreuses méthodes, des équipements spécifiques et différentes modifications des centrales à béton ont été essayés. En ce qui concerne les fibres

cement substitutes, but strengths at ages of 90 days and older will be equivalent to or higher than those of concretes utilizing straight portland cement.

Admixtures are an important part of any concrete, including FRC. The value of entrained air for freezing and thawing durability and improved workability has long been established. Normally recommended ranges of air content should be used because, as with conventional concrete, abnormally high air contents can adversely affect the compressive strength of FRC, and abnormally low air contents will adversely affect the freeze/thaw durability.

Water-reducing admixtures reduce the water requirement, have some retarding effect, and usually aid in handling the FRC under field conditions. It is recommended that with the high cement factors usually used for FRC the quantity of water-reducing admixture be maintained less than normally recommended for conventional concrete. In addition to economy, the lower water-reducing admixture quantity appears to result in improved reductions in slump loss.

Water-cement ratios used in FRC must be given particular attention. The tendency to increase water contents and eliminate many of the beneficial properties desired from the addition of fibers should be avoided. In FRC, water-cement ratios (w/c) ranging from 0.41 to 0.48 are normal. Paving and some special structural applications may require a lower range (w/c of 0.38 to 0.44), but this also results in more difficulty in placement. At the upper end of the w/c range, tests have shown that a point of water addition is reached where slump continues to increase with more water but actual workability under vibration is not improved. At this point, the quality of the concrete is being decreased significantly with no benefit to workability. As indicated previously, all involved with the use of FRC should be aware of the workable property of the concrete with vibration and avoid unnecessary additions of mixing water based on appearance only.

7 — BATCHING, MIXING, TRANSPORTING, AND PLACING

There are two broad aspects to be considered for the satisfactory use of FRC:

- Adequate strength and basic engineering properties to meet structural design requirements, and
- Constructibility including mixing, transporting, placing, and finishing.

Many important factors are involved in successfully mixing and handling FRC. Each mixture should be considered individually to ensure that a workable concrete of low unit water demand, shrinkage, slump loss, and bleeding is provided for the specific work involved.

Proper introduction of fibers into the mixture is critical to obtaining concrete free of fiber balls at reasonable production rates. Many procedures, specific equipment, and various modifications to existing batch plants have been tried. For the old-style individual straight fibers, no simple and dependable field modification

droites de type ancien, aucune modification simple et sûre n'a été réalisée sur le chantier afin de permettre d'opérer directement le dosage pondéral et le changement dans la bétonnière depuis une trémie, comme c'est la pratique habituelle pour les granulats et le ciment. Cependant, quelques fibres spéciales qui ont des déformations permettant une forme plus courte et plus rigide pourront s'écouler depuis une trémie à travers sa porte ouverte. C'est le cas, par exemple, de la fibre courte, d'environ 13 mm de longueur, aux bouts gaufrés ou élargis, disponible en Australie. Normalement, les fibres droites doivent passer au tamis vibrant ou distributeur de fibres qui les sépare et les introduit dans le mélange en tant qu'éléments individuels. Sans ce tamisage, les fibres s'entremêlent et forment des agglomérats ou des boules de fibres qui ne se disloquent pas dans le mélange. Un fournisseur a résolu le problème du gâchage au moyen d'un procédé de fabrication consistant à coller légèrement trois à huit fibres environ sous forme de touffes. Les touffes sont suffisamment rigides pour être déversées directement dans le mélange sans s'entremêler. Dans le mélange, la colle se ramollit et l'action mécanique de malaxage sépare les fibres qui se répartissent dans tout le béton. Il faut bien s'assurer que la colle se ramollit et que les fibres se disloquent de façon qu'elles soient distribuées individuellement dans tout le mélange pendant la durée de malaxage souhaitée. En ce qui concerne le béton projeté utilisant la méthode dite « sèche », la colle doit être étendue en couche plus fine de façon que les fibres se séparent plus facilement.

Indépendamment du type de fibre, un malaxage satisfaisant dépend du rapport longueur/diamètre de chaque fibre. Plus ce rapport est élevé, plus le malaxage devient difficile. Des concentrations élevées de fibres rendent le malaxage plus difficile, tandis que des fibres plus raides conduiront à un malaxage plus facile, quel que soit le rapport.

Il faut s'assurer que les fibres ne s'agglomèrent pas après leur passage au tamis vibrant. Cela peut survenir dans les situations suivantes : les fibres tombent d'un transporteur à bande sur un autre; les transporteurs à bandes rebondissent sur leurs rouleaux; une surcharge de fibres descend dans le tambour de la bétonnière; les fibres sont projetées contre le bord de l'ouverture en haut de la bétonnière portée; les fibres sont transférées d'un transporteur à bande très rapide vers un transporteur plus lent.

Les méthodes de gâchage et de malaxage utilisées avec succès sont variées. La méthode la plus utilisée et la plus efficace consiste à ralentir l'alimentation en granulats et à les introduire simultanément avec les fibres, les adjuvants, le ciment, la pouzzolane, la majeure partie (approximativement 90 %) de l'eau et les autres ingrédients. Avec cette méthode, les composants se mélangent au fur et à mesure qu'ils entrent dans la bétonnière et on réduit donc les tendances à l'agglomération. Après que les matériaux pré-mélangés aient été chargés, l'eau restante est ajoutée selon les besoins, afin d'obtenir la consistance voulue ou le rapport eau/ciment et de rejeter les fibres et le ciment restant dans le fond de la bétonnière. D'autres méthodes de gâchage et de malaxage utilisent : 1) le prémalaxage des gros granulats et des fibres, pour qu'un dosage pondéral puisse se faire en même temps, au moment du malaxage, 2) l'incorporation lente des fibres tamisées dans le béton déjà malaxé, 3) le déversement de fibres directement dans le mélange déjà gâché.

Le transport et la mise en place du BAF peuvent être réalisés dans des conditions satisfaisantes à l'aide d'un matériel de bétonnage classique bien conçu.

has been developed that permits direct weight batching and charging into the mixer from a hopper or bin, as is conventionally done with aggregate and cement. However, some special fibers that have deformations which allow a shorter and stiffer shape will flow from a bin and through its opened gate. An example is the short fiber, about 1/2 in (13 mm) long, with crimped or enlarged ends, available in Australia. Normally, individual straight fiber types must be sifted through a shaker or fiber feeder that separates them and introduces them into the mix as individual fiber elements. Without this sifting, the fibers will tangle together and form clumps or fiber balls that do not break apart in the mix. One supplier has overcome the batching problem by manufacturing fibers in a manner that lightly glues about three to eight fibers together in collated clumps. The clumps are stiff enough to allow them to be dumped directly into a mixture without tangling. After they are in the mixture, the glue softens, the mechanical action of mixing separates the fibers, and they distribute themselves throughout the concrete. Attention must be given to ensure that the glue softens and the fibers break apart so that they become individually distributed throughout the mix during the desired mixing time. For shotcrete by the "dry" method, the glue must have a lighter coating so that the fibers separate more easily.

Regardless of the fiber type, satisfactory mixing is related to the length-to-diameter ratio (aspect ratio) of the individual fibers. The higher this ratio, the more difficult mixing becomes. High fiber concentrations cause more difficult mixing, while stiffer fibers will result in easier mixing for any given aspect ratio.

Care must be taken to see that individual fibers do not clump together after being sifted out in the shaker. This may occur when fibers drop from one conveyor belt to another, when conveyor belts carrying the fibers bounce over their rollers, when an overload of fiber works its way down the mixer drum surfaces, when the fibers are tossed against the side of the opening at the top of a transit mix truck, and when they are transferred from a high-speed conveyor belt to a slower speed belt.

Batching and mixing procedures used successfully in the field have varied. The method most frequently and successfully used consists of slowing down the aggregate feed and introducing it simultaneously with the fibers, admixtures, cement, pozzolan, the majority (approximately 90 %) of the mixing water, and other ingredients. This preblends the mix constituents as they enter the mixer and minimizes any balling tendency. After the preblended materials have been charged, the remaining water is added as necessary to obtain the desired consistency or water-cement ratio, and to flush down any fibers and cement from the back of the mixer. Other procedures used for batching and mixing include preblending coarse aggregates and fibers so that they can be weigh-batched together through bins at the time of mixing, adding the fibers slowly into an already mixed concrete after sifting them out, and dumping collated fibers directly into an already batched mix. Storage of preblended materials should be limited to a maximum of about one day to avoid rusting of the fibers.

Transporting and placing FRC can be accomplished with most well-designed conventional concreting equipment in satisfactory and clean condition. However,

Pourtant, quelques procédés importants doivent être adoptés. Il est conseillé de charger les camions-bétonnières d'une capacité inférieure à leur maximum, surtout si le malaxage ou une partie importante de l'agitation doit se faire dans les camions. Par exemple, un tambour de 6,75 m³ ne devrait pas être chargé à plus de 6 m³. Les lames à l'intérieur de la bétonnière doivent être propres et en bon état. Faute de quoi, un mauvais malaxage et une agglomération de fibres peuvent se produire. Il faut plus d'énergie pour faire tourner un tambour plein de béton avec fibres qu'un tambour plein d'un mélange comparable de béton classique, mais la plupart des camions disposent de cette capacité d'énergie supplémentaire. Les mêmes principes s'avèrent vrais pour les bétonnières malaxieuses utilisées dans les centrales à béton pour éléments préfabriqués.

Le déchargement des camions-bétonnières, des bétonnières fixes à tambour et des bétonnières malaxieuses s'accomplit généralement avec peu ou pas de problèmes. Parfois, lorsqu'un béton consistant ou un équipement en mauvais état est employé, le béton ne tombe pas facilement de la bétonnière. On peut dire que, dans la plupart des cas, le BAF bien dosé glisse tout juste de lui-même le long de la goulotte du camion-bétonnière, et peut nécessiter l'aide manuelle du conducteur du camion. Quand un BAF particulièrement consistant est utilisé, l'avant du camion peut être monté sur des blocs ou sur une rampe afin de faciliter le déchargement du mélange.

Les bennes à béton doivent avoir des pentes de trémie raides, être propres et lisses à l'intérieur et posséder de larges ouvertures de vannes. Il est à craindre que le BAF ne « s'accroche » dans les bennes qui ne répondent pas à ces exigences. Le béton bloque l'ouverture des vannes et, de ce fait, ne sort pas librement. Un vibreur placé au niveau de la benne, au moment du déchargement, est une solution. Pour faciliter l'emploi de la benne, quand il s'agit de mélanges particulièrement consistants, un vibreur peut être soudé sur le côté de la benne et mis en marche au moment où la vanne est ouverte. Une autre méthode, souvent utilisée, consiste à souder des morceaux de tuyaux à l'extérieur de la benne, dans lesquels on introduit l'extrémité vibrante du pervibrateur. La mise en marche du pervibrateur, lorsque la vanne est ouverte, facilitera le déchargement du BAF de la benne.

Sur un aménagement, un équipement employé pour le transport de BAF le long d'un puits d'accès vertical consistait en une grande trémie soudée au sommet d'un tuyau de 152 mm de diamètre, descendant verticalement le long du puits d'accès. Au fur et à mesure de son déchargement dans la trémie, le béton bouchait l'ouverture du tuyau. Lorsque le personnel placé à l'extrémité de sortie du tuyau était prêt à recevoir le béton, un vibreur était plongé dans le BAF contenu dans la trémie, le béton devenait fluide et coulait à grande vitesse le long du tuyau. On ne constata aucune ségrégation, ni dans le tuyau, ni à la sortie du béton.

Le pompage a été utilisé sur de nombreux aménagements pour transporter le béton armé de fibres. Certaines installations comportaient un pompage vertical à une profondeur de 30 m environ. La mise en place la plus osée fut celle utilisant un tuyau de 290 m environ de longueur, coudé en plusieurs endroits à la traversée d'une assise rocheuse, pour une dénivellation verticale de près de 30 m; l'extrémité du tuyau était munie d'une conduite flexible. Plusieurs centaines de mètres cubes de béton furent ainsi mis en place avec succès.

Un mélange de BAF bien conçu a des dosages, une granulométrie de gros granulats et de granulats fins, et des adjuvants qui le rendent idéal pour le pompage. Il arrive souvent que le responsable de la pompe, en examinant le

some important procedures should be followed. It is advisable to load transit mix trucks to less than their full capacity, especially if mixing or a significant amount of agitation is to be accomplished in the trucks. For example, a 9 yd³ (6.75 m³) drum should be limited to 8 yd³ (6 m³). The blades inside the truck must be clean and in good condition. Improper mixing and balling of the fibers could otherwise result. More power is required to rotate a drum full of fiber concrete than a comparable conventional mix, but most trucks have this additional power capability. The same principles hold true for “pan” type mixers used at precast plants.

Discharging from transit mix trucks, stationary drum mixers, and “pan” type mixers is usually accomplished with little, if any, trouble. When a stiffer concrete or equipment in poor condition is used, the concrete will not drop easily from the mixer. As a “rule of thumb,” well-proportioned FRC will barely slide down the chute of a transit mix truck by itself and may need some manual help from the truck operator. When especially stiff FRC is used, the front of the truck can be driven onto blocks or a ramp to help discharge the mix.

Concrete buckets should have steep hopper slopes, be clean and smooth inside, and have large gate openings. FRC can be expected to “hang up” in buckets that do not meet these requirements. The concrete bridges the gate opening, preventing it from falling out freely. The solution is to provide a vibrator at the bucket when discharging. To facilitate bucket placement of especially stiff mixes, a form vibrator can be welded to the side of the bucket and activated when the gate is opened. Another procedure that has been used frequently is to weld pieces of pipe to the exterior of the bucket into which the end of the internal vibrator can be inserted. Activating the vibrator when the gate is opened will facilitate discharge of FRC from the bucket.

On one project, equipment used to transport FRC down a long vertical access shaft consisted of a large hopper welded to the top of a 6-in. (152 mm) pipe which projected vertically down an access shaft. As the concrete was dumped into the hopper, it bridged the opening into the pipe. When personnel at the discharge end of the pipe were ready to receive concrete, a vibrator was dropped into the FRC in the hopper, and the concrete became fluid and flowed down the pipe at high velocity. No segregation occurred either in the pipe or when the FRC was deposited at the receiving end.

Pumping has been used to transport fibrous concrete on a number of projects. Some involved pumping vertically down about 100 ft (30 m). The most challenging pump placement involved about 950 ft (290 m) of line having several bends and elbows where the line traversed a rock ledge, a vertical drop of about 100 ft (30 m), and use of a flexible hose at the end of the line. Many hundreds of cubic yards were pumped successfully in this placement.

A well-designed FRC mixture has proportions, a gradation of fine and coarse aggregates, and admixtures which make it ideal for pumping. A usual occurrence is for the pump operator to look at the first FRC delivered and immediately

premier BAF déchargé, conclue aussitôt à l'impossibilité du pompage. Il faut éviter à tout prix de retarder l'opération de mise en place et de discuter du problème observé (mais non réel) alors que le béton commence à faire prise dans le camion. Après avoir amorcé la pompe avec du coulis, le BAF passera facilement à travers une pompe bien conçue et entretenue. Grâce à ses propriétés, le béton s'écoulera le long du tuyau avec peu de risque de ralentissements. On a souvent affirmé que le BAF se pompait plus facilement que le béton classique. Les recommandations portant sur le matériel et les procédés à utiliser pour faciliter le pompage du BAF sont les suivantes :

- 1) utiliser des pompes capables de mettre en œuvre les volumes et d'appliquer les pressions nécessaires;
- 2) utiliser des tuyaux de grands diamètres, 155 mm environ;
- 3) éviter les tuyaux flexibles, si possible;
- 4) placer des grilles au-dessus des trémies des pompes pour empêcher que des boules de fibres n'entrent dans les tuyaux (ouvertures nettes de 50 à 75 mm);
- 5) ne pas essayer de pomper des mélanges avec fibres, d'affaissement (slump) excessif. Si on procède au pompage de tels mélanges, la pâte et le mortier fin sont expulsés à l'avant du reste du mélange, provoquant des agglomérats de fibres qui bloquent le passage des plus gros granulats; il en résulte des bouchons ou des arrêts.

La méthode du béton projeté est également utilisée pour la mise en place du BAF. Des applications pratiques ont été réalisées sur des talus rocheux pour leur stabilisation et dans des tunnels pour leur revêtement. Les méthodes se sont avérées bonnes, tant sur le plan de la mise en œuvre que sur celui de la performance sur le chantier. Un nombre important d'ouvrages en béton projeté armé de fibres ont été réalisés en Scandinavie, dans l'Ouest du Canada et aux Etats-Unis.

L'emploi de béton projeté armé de fibres a été normalement limité aux mélanges de mortier ou de graviers fins (9,5 mm) et à des couches relativement minces (6,5 cm d'épaisseur), bien que des essais ayant utilisé de plus gros granulats et ayant porté sur des épaisseurs plus importantes aient été réussis. Un béton projeté armé de fibres, type, appliqué sur le chantier, contient 53 à 148 kg de fibres et environ 355 à 475 kg de ciment par mètre cube. Dans le passé, des teneurs plus élevées en ciment et en fibres ont été utilisées.

A ce jour, les fibres employées dans le béton projeté avec le plus de succès ont environ 15, 20 ou 25 mm de longueur et des diamètres de 0,25 à 0,51 mm. Les données sur le béton projeté armé de fibres, présentées dans des publications et dans des rapports, indiquent des proportions plus élevées de ciment et de fibres que celles mentionnées ci-dessus [7, 8, 15]. Pourtant, quand on utilise les données recueillies sur le terrain et que des calculs sont faits pour tenir compte du rendement, de la teneur en air, des densités, etc., les proportions sont comparables à celles indiquées ci-dessus.

Le « procédé sec » est employé le plus souvent pour le béton projeté et s'avère alors compatible avec le BAF. Le « procédé humide » peut également être utilisé, mais son emploi pour le BAF est limité. Une méthode suédoise consistant à couper les fils à la longueur voulue, à la tuyère, à partir d'une bobine de fil, a très bien réussi avec le procédé sec.

Jusqu'à ce qu'une couche de mortier soit déposée, les fibres auront un taux élevé de rebond. Cela peut être évité par l'application d'une première couche mince de béton projeté sans fibres avant la mise en œuvre du mélange contenant des

complain that it cannot be successfully pumped. One of the worst things that can occur is to delay the placement operation and discuss the perceived (but not real) problem while the concrete starts to stiffen in the truck. After priming the pump with grout, FRC will move easily through a properly designed and maintained pump system. Because of its properties, the concrete will move through the line with minimal potential for "slugs." FRC frequently has been reported to pump more easily than conventional concrete. The principal equipment and procedures for facilitating the pumping of FRC are:

- Use pumps capable of handling the volume and pressures needed.
- Use large-diameter lines, about 6 in (155 mm).
- Avoid flexible hoses where possible.
- Provide screens over pump hoppers to prevent fiber balls from entering the lines, about 2 in by 3 in (50 by 75 mm) clear openings.
- Do not try to pump fibrous mixtures of excessive slump. When excessive slumps are used, the paste and fine mortar are squeezed out ahead of the rest of the mixture, causing mats of fibers to develop which strain out the larger aggregate and cause plugs or stoppages.

Shotcrete is another method of placing FRC. Practical applications have been completed on rock slopes for stabilization and in tunnels for lining. The procedures have worked well on the basis of both constructibility and field performance. A considerable number of fiber shotcrete projects have been completed in Scandinavia, Western Canada, and the United States.

Fibrous shotcrete has usually been limited to mortar mixes or "pea" gravel (9.5 mm) mixtures and relatively thin sections 2.5 in (6.5 cm) thick, although trials have been successful with larger aggregates and thicknesses. A typical field-applied fiber shotcrete contains 90 to 250 pounds of fibers per cubic yard (53 to 148 kg/m³) using cement factors on the order of 600 to 800 pounds of cement per cubic yard (355 to 475 kg/m³). In the past, higher cement and fiber contents had generally been used.

Fibers most successfully applied in shotcrete to date are on the order of 1/2, 3/4, or 1 in (15, 20, or 25 mm) long with diameters of 0.010 to 0.020 in (0.25 to 0.51 mm). Data on fibrous shotcrete have been presented in a number of publications and reports which indicate cement and fiber proportions higher than those reported above [7, 8, 15]. However, when the field data are used and calculations are made to adjust for yield, air content, specific gravities, etc., the proportions are comparable to those given above.

The "dry process" has been used most frequently for shotcrete and has proven itself compatible with FRC. The wet process can also be used, but its use with FRC is limited. A Swedish system which cuts the fiber to length at the nozzle from a full-length spool of wire has worked very well with the dry process.

Until a layer of mortar is built up, fibers will have a high rebound. This may be avoided by applying a thin starter layer of shotcrete not containing fibers prior

fibres. Les résultats obtenus in situ, pour des couches de 76 mm d'épaisseur, en utilisant un béton projeté ordinaire, indiquent une perte par rebond d'à peu près 13 %.

La méthode d'application dite « projection (spray-up) », utilisée pour des couches armées de fibres de verre, est un procédé assez particulier. Les fibres de verre consistent en des filaments qui commencent par se séparer et s'entremêlent dans la plupart des mélanges lorsqu'ils sont agités. Cela rend très difficile la mise en place avec le matériel classique. Heureusement, la méthode dite « projection » de malaxage et de mise en place permet la mise en œuvre avec de fortes concentrations de fibres. Le procédé consiste à projeter d'une tuyère un mélange de mortier humide, tout en coupant et soufflant des fibres de verre provenant d'un fil continu enroulé sur une bobine. Les fibres sont coupées au moyen d'une lame se trouvant au niveau de la tuyère. Les couches ainsi préparées ont environ de 5 à 20 mm d'épaisseur et possèdent une malléabilité et une résistance extrêmement élevées. Malheureusement, les mélanges sont normalement riches en ciment et peuvent manifester une instabilité dimensionnelle liée aux variations d'humidité et de température. L'épaisseur requise est obtenue par la pose de couches de 3 mm d'épaisseur. Après son application, la couche doit être légèrement roulée à l'aide d'un appareil analogue au rouleau strié utilisé en peinture. Cela permet d'assurer un intime contact des fibres avec la matrice de ciment et réduit la possibilité de développement d'un feuilletage au niveau de chaque couche. Cette méthode a été utilisée pour revêtir des surfaces de béton soumises à des charges d'eau jusqu'à 30 m dans des conditions sévères d'exposition [20], mais elle n'a pas encore été adoptée pour revêtir un évacuateur de crue ou un bassin d'amortissement. Une excellente liaison et des valeurs très basses du rapport eau/ciment ont été obtenues dans ces applications, en ajoutant au mortier du latex (polymère en émulsion).

8 — FINITION

La finition du BAF peut se faire à l'aide d'un matériel classique et seuls quelques raffinements mineurs dans les techniques et l'exécution sont nécessaires. Des ouvriers chargés du fini du ciment, même s'ils n'ont jamais travaillé sur ce matériau, n'ont habituellement aucun problème. Aucune attention spéciale n'est requise pour les surfaces coffrées planes. La surface devra être lisse et sans fibre apparente lorsque les coffrages seront enlevés. Les bords et les coins doivent être chanfreinés ou arrondis lorsque cela est possible, afin que les bouts des fibres ne dépassent pas, car, sinon, ce n'est pas esthétique et ce peut être dangereux. Les surfaces de dalles exposées doivent être arasées au moyen d'un profileur vibrant ou complètement compactées en utilisant un vibreur interne. Les meilleurs résultats sont obtenus avec un profileur vibrant. Le profileur doit avoir des bords légèrement arrondis et être de préférence métallique. Dans les endroits où le profileur ne s'adapte pas, un tuyau-vibreur (« jitterbug ») peut être utilisé pour compacter la surface et contrôler le degré de rugosité. Des taloches en bois peuvent également être employées pour constituer une surface et fermer les déchirures ou craquelures provoquées par le profileur. Cependant, la taloche en bois laissera une surface rugueuse comportant des fibres. Le fini naturel de la surface du béton projeté laissera également apparaître des fibres. A moins que des considérations architecturales ou de sécurité du personnel n'exigent un fini plus satisfaisant, la

to using the mixture containing fibers. Field results obtained for 3 in (76 mm) thick sections using fibrous shotcrete routinely show a rebound of about 13 percent.

The "spray-up" method of application used for fiberglass reinforced coatings is a rather specialized procedure. The glass fibers consist of filaments or hairs which begin to separate and mat together in most mixtures when agitated. This makes placement with conventional equipment very difficult. Fortunately, the "spray-up" method of mixing and placement permits practical placement at high fiber concentrations. The process consists of spraying a wet mortar mix out of a nozzle while simultaneously chopping and blowing fiberglass from a continuous strand using a separate cutter head located at the mortar nozzle. Coatings made with this process are usually on the order of 0.20 to 0.80 in (5 to 20 mm) thick and have extremely high strengths and ductility. Unfortunately, the mixes are normally rich in cement and may exhibit dimensional instability with varying humidity and temperature. The required thickness is developed by building the layer out in a number of coatings, usually 0.120 in. (3 mm) thick. Between each successive coat, the layer should be lightly rolled using a device similar to a serrated paint roller. This ensures that the fibers are pressed into intimate contact with the cementing matrix and minimizes any possibility of developing distinct laminations at each coating depth. The process has been used to face concrete surfaces subject to hydraulic heads up to 100 ft (30 m) in severe exposure conditions [20], but it has not yet been used as a spillway or stilling basin coating. Excellent bond and very low water-to-cement ratios have been achieved in these applications by including a latex (emulsified polymer) with the mortar.

8 — FINISHING

Finishing FRC can be accomplished with conventional equipment. Only minor refinements in techniques and workmanship are required. Cement finishers who have never worked with the material usually have no problems. No special attention is needed for flat formed surfaces. The surface will be smooth and not show fibers when the forms are stripped. When possible, chamfers or rounds should be provided at edges and in corners to avoid protrusion of fibers ends, which is unsightly and can be a hazard. Open slab surfaces should be struck off with a vibrating screed or thoroughly consolidated with internal vibration. The best results are obtained with a vibrating screed. The screed should have slightly rounded edges and should preferably be metal. In areas where a screed does not fit, a jitterbug can be used for surface compaction to establish rough grade control. Wood floats can be used to establish a surface and close any tears or open areas which are caused by the screed. However, the wood float will leave a rough texture with some fibers at the surface. The natural gunned finish of shotcrete will also leave fibers exposed and normally leaves some of them actually protruding from the mix. Unless there are architectural or personnel safety reasons for requiring a more pleasing finish, the best quality shotcrete surface from a materials standpoint is the natural gunned condition. Exposed fibers will oxidize with time and disappear, leaving only a rust-colored stain in their place. If necessary, a thin

surface d'un béton projeté, présentant la meilleure qualité, du point de vue des matériaux, est la surface naturelle obtenue par projection. Les fibres exposées s'oxyderont dans le temps et disparaîtront, laissant seulement des taches de couleur rouille. Si nécessaire, une mince couche de béton, ne contenant pas de fibres, peut être projetée, ou des outils courants de finition peuvent être utilisés pour aplanir et lisser la surface et lui donner un meilleur aspect.

Pendant toutes les opérations de finition, il faut veiller à ne pas travailler outre mesure la surface. Une finition excessive du BAF qui a normalement une haute teneur en ciment amènera des granulats fins à la surface et aura pour résultat final de faire apparaître des craquelures à la surface. Cela apparaîtra normalement après la période de cure. Si un ressuage a lieu ou si des granulats fins sont ramenés à la surface, l'eau excédentaire et les granulats fins doivent être, au moyen d'un profileur ou d'un tuyau en caoutchouc, drainés et rejetés. L'assèchement par aspiration (vacuum dewatering) est une autre méthode d'enlèvement. Après les travaux à la taloche en bois, on doit laisser reposer la surface jusqu'à ce qu'elle puisse être finie sans dommages provoqués par un excès de travail. Ceci se situe habituellement au moment de la prise initiale. Quand une finition soigneuse ne s'impose pas, pour des raisons d'esthétique ou de tolérance précise, aucun travail supplémentaire n'est utile après le passage de la taloche en bois. Si une surface anti-dérapante est nécessaire, un balai ou un rouleau peut être utilisé avant le début de prise. Il ne faut pas passer une toile de jute car elle déchirerait la surface et découvrirait les fibres. Pour une finition supplémentaire, il faut employer des taloches en métal au magnésium. Quand la finition se fait à la main, les taloches doivent être maintenues à plat et non sur les bords. Comme pour le béton classique, un mouvement de sciage (petit, rapide, d'avance et de recul) doit être adopté. Des taloches en métal au magnésium peuvent être utilisées pour établir une surface presque parfaitement plane, enterrer et recouvrir les fibres, et laisser une fine texture. Des taloches plus grandes sont d'un emploi plus difficile mais donneront des finitions plus planes et meilleures. Les taloches manuelles en métal au magnésium sont rigides et présentent une surface de contact courbe ou elliptique. La rigidité empêche la flexion et donne ainsi une surface plane. La forme elliptique permet à la surface du béton d'atteindre un point de pression concentrée sous la courbe, au fur et à mesure que l'outil est passé dessus, et petit à petit elle réduit la pression demandée. La pression provoque un compactage local ainsi que la suppression des variations de surface, et le relâchement progressif de la pression élimine la tendance qu'ont les fibres à sortir de la surface. Une mauvaise utilisation de la taloche et son maintien sur le bord ont pour conséquence de découvrir les fibres, ce qui est laid et potentiellement dangereux.

Le travail à la taloche en métal au magnésium peut être suivi d'un travail à la truelle en acier si on désire une surface très dure et lisse. La truelle en acier doit être maintenue à peu près à plat sinon son bord fera ressortir les fibres comme dans l'opération précédente. En utilisant ces techniques, on peut obtenir un béton armé de fibres de finition excellente. Des vérifications détaillées sur un radier courbe d'évacuateur de crue et un radier plat de bassin d'amortissement avec des bords droits et courbes ont montré des variations maximales de 1 à 2 mm par longueur de 3 m.

final pass of shotcrete can be applied using a mix with no fibers, or standard finishing tools can be used to float and trowel the surface to a more acceptable appearance.

Throughout all finishing operations, care must be taken not to overwork the surface. Excessive finishing of FRC, which is normally high in cement content, will bring excessive fines to the surface and ultimately result in a crazing crack pattern. This will normally appear after the cure period. If bleeding occurs or if excessive fines are brought to the surface, the extra water and fines should be removed by screeding or rubber hose drag and wasted. Another method of removal is by vacuum dewatering. After completion of any wood float work, the surface should be left alone until it can be finished further without damage from overworking. This is usually about the time of initial set. Where a careful finish is not required for appearance or exact tolerance, no further work is needed after wood floating. If a texture is required for skid resistance, a broom and roller can be used prior to initial set. Burlap drags should not be used because they will tear the surface and expose fibers. When additional finishing is required, magnesium floats should be used. When finishing is by hand, floats should be held flat and not on edge. As with conventional concrete, a sawing motion (short, quick back and forth movements) should be used. Magnesium floats can be used to establish a nearly perfect flat surface, bury and cover fibers, and leave a slight texture. Larger floats are more difficult to use but will result in flatter and better finishes. Hand-held magnesium floats are rigid and have a curved or elliptical shaped bottom surface. The rigidity prevents flexing and thereby results in a flat surface. The elliptical shape causes the concrete surface to gradually reach a concentrated pressure point under the curve as the tool is drawn over it, and gradually reduces the required pressure. The pressure causes local densification and removal of surface variations, and the gradual pressure release eliminates the tendency for fibers to spring out at the surface. Improper operations with the float held on edge result in unsightly and potentially hazardous exposure of fibers at the surface.

Magnesium floating can be followed by steel troweling if a very hard and smooth surface is desired. The steel trowel must be kept nearly flat or the edge will cause fibers to spring out at the surface as described previously for magnesium floating. Using these techniques, excellent finishes of fiber concrete can be obtained. Detailed checks on one curved spillway and flat stilling basin floor with straight edges and templates typically showed maximum variations held to the order of only 0.04 to 0.08 in (1 to 2 mm) per 10 ft (3 m) of length.

9 — CONTRÔLE DE LA QUALITÉ

Les prescriptions relatives au contrôle de la qualité du BAF sont identiques à celles appliquées au béton classique :

1) essais prélabes en laboratoire pour établir les limites pratiques d'obtention de la qualité,

2) essais in situ pendant les travaux,

3) inspection de la centrale à béton,

4) inspection sur la zone de mise en place,

5) inspection de la cure et de la protection.

Les différences importantes existant entre le contrôle de la qualité du béton classique et celui du BAF sont indiquées ci-après.

La méthode de stockage des fibres doit empêcher leur oxydation et leur agglomération. Les fibres doivent rester couvertes et sur palettes quand elles sont empilées. Quand elles sont stockées à l'extérieur, elles doivent être enveloppées de bâches ou de feuilles de polyéthylène pour être protégées de la pluie. Des fibres expédiées dans des sacs en plastique peuvent subir les effets de la condensation à l'intérieur des sacs, résultant des changements de conditions atmosphériques entre l'usine d'emballage et le chantier. Une légère décoloration provenant de l'oxydation peut être tolérée, sans effets défavorables, mais, quand la rouille a aggloméré les fibres ou les a rendues moins résistantes, on ne doit pas les utiliser. Le stockage des fibres sur un plancher vibrant constamment risque de tasser les fibres et de les consolider, ce qui posera des problèmes de manutention. Si les fibres assemblées avec de la colle doivent être stockées longtemps par temps chaud, le fabricant devra en être averti; la colle peut durcir et les fibres peuvent devenir plus difficiles à séparer sous certaines conditions, mais le fabricant peut en général modifier la colle, si cela est nécessaire, pendant le traitement.

Dans les centrales à béton, il est important de s'assurer que les fibres ne sont pas ajoutées dans le mélange plus rapidement qu'il n'est possible de les mélanger dans le béton sans qu'elles s'emmêlent ou surchargent la bétonnière. Les agglomérats de fibres ne doivent pas pouvoir entrer dans la bétonnière, et les trous du tamis vibrant à travers lesquels les fibres tombent pendant le gâchage doivent être vérifiés régulièrement pour s'assurer qu'ils ne se bouchent pas. La variation autorisée du poids de granulats par gâchée peut aussi être retenue pour les fibres, sans affecter d'une manière significative la consistance d'une gâchée à l'autre.

On doit surveiller de près sur le chantier de mise en place la formation éventuelle de boules ou l'emmêlement des fibres. Si cela se produit, il s'agira normalement d'un agglomérat de fibres enveloppé de mortier. Restant en place, il créera un vide. Un certain nombre de vides de dimensions assez notables en des endroits critiques peuvent provoquer la fissuration où la rupture de la structure achevée. Cependant, les agglomérats de fibres doivent être examinés, car ils peuvent être remplis de mortier; dans ce cas, ils constituent un élément solide de granulats de dimension supérieure à la moyenne et n'ont pas besoin d'être enlevés. Des boules « sèches » indiquent que l'agglomérat était probablement formé avant qu'il n'entre dans la bétonnière, laissant supposer un problème de gâchage; des boules « mouillées » indiquent une étude incorrecte de la composition, un type de fibre inapproprié, ou un problème de malaxage.

9 – QUALITY CONTROL

Requirements for quality control of FRC are similar to those for conventional concrete. They fall into five basic categories:

- (1) Initial laboratory and investigative tests to establish the practical limits of achievable quality;
- (2) Field tests during construction;
- (3) Inspection at the batch plant;
- (4) Inspection at the placement; and
- (5) Inspection of curing and protection.

The important differences between conventional and FRC quality control follow.

The method of fiber storage should prevent fiber oxidation and packing. Fibers should be kept under cover and on pallets when stacked. When stored outside, they should be wrapped with tarps or polyethylene sheeting to protect them from rain. Fibers shipped in plastic bags can experience condensation within the bag under changes in atmospheric conditions between the packaging plant and job site. Some minor discoloration from oxidation can be tolerated without adverse effects, but when rusting interlocks or weakens the fibers, they should not be used. Storing fibers on a floor which continually vibrates can cause fibers to “shake down” and consolidate, thus causing difficulty in handling. If collated fibers with glue are to be stored for an extended time in hot weather, the producer should be contacted. The glue can harden and the fibers become more difficult to separate under certain conditions. However, the manufacturer can usually modify the glue, if needed, during processing.

At the batch plant, it is important to ensure that the fibers are not added into the mix at a rate faster than they can be blended into the concrete without tangling or overloading the mixer. Fiber clumps should not be allowed to enter the mixer, and shaker screen openings through which the fibers drop during the batching process should be checked routinely to ensure that they do not become plugged. Variation in batch weight allowed for aggregates can also be permitted for fibers without significantly affecting batch-to-batch consistency.

A key inspection item at the placement site is to watch for fiber balls or tangles. If these occur, they normally will consist of a clump of fibers coated with mortar. When permitted to remain in the placement, they will result in a void. Enough voids of sufficient size in critical areas can lead to cracking or failure in the completed structure. However, clumps should be inspected because they could be filled with cementing matrix, in which case they represent a strong piece of oversize aggregate and would not have to be removed. “Dry” balls indicate the clump was probably formed before it entered the mixer, pointing to a problem with batching; wet balls indicate an improper mix design, improper fiber type, or a mixing problem.

Les essais pour le contrôle de qualité devraient se conformer aux recommandations de l'Institut Américain du Béton (ACI) [1]. L'ouvrabilité, la résistance à la flexion et la résistance à la compression permettent de juger de la qualité du béton. L'ouvrabilité a été définie de manières différentes et d'après des essais variés, mais c'est simplement cette propriété du béton frais qui détermine l'aptitude au malaxage, à la manutention, au transport et à la mise en place du béton, avec une perte minimale d'homogénéité. L'essai d'ouvrabilité est une mesure de la difficulté de ce qui est à accomplir. L'essai d'affaissement (slump) standard de l'ASTM (American Society for Testing and Materials) est un essai courant, rapide et économique pour du béton classique, mais malheureusement il n'est pas particulièrement utile pour le béton armé de fibres. Il peut être employé comme indicateur rapide de l'uniformité relative pour le BAF, mais les résultats doivent être appréciés avec prudence. L'essai Vebe est une bonne méthode pour mesurer l'ouvrabilité du BAF, mais malheureusement il n'est pas commode à mettre en œuvre sur le chantier. L'essai du « cône inversé » [1, 3] a été utilisé avec succès pour mesurer et observer visuellement comment le mélange se fluidifie quand il est l'objet de vibrations internes. Cet essai mesure la durée nécessaire au ciment pour couler à travers l'orifice réduit d'un cône inversé, pendant qu'il est soumis à l'action d'un vibreur interne.

La résistance à la compression est rarement le paramètre d'étude le plus important pour le BAF. Cependant, les essais de résistance à la compression sont importants pour maintenir le contrôle du mélange de base. Les essais identifieront les problèmes posés par les granulats, les rapports eau/ciment, le ciment, etc., comme ils le font pour le béton classique.

Les fibres n'ayant que peu d'effets sur la résistance à la compression, cet essai n'indiquera pas s'il y a un problème posé par la fibre elle-même. L'essai de flexion d'une poutre et l'essai de dureté montrent cependant nettement comment la partie fibre du béton réagit. Un autre essai qui est un indicateur valable de l'assurance de qualité du BAF est l'épreuve des chocs [1, 2, 14].

La préparation des éprouvettes est décisive dans les essais sur le BAF. Il est recommandé d'adopter les procédés décrits par l'ASTM [2] et l'ACI [1]. Toutefois, quand cela est possible, les éprouvettes doivent être préparées en utilisant seulement la vibration extérieure. La vibration interne est acceptable dans de nombreux cas, mais l'utilisation d'une tige doit être évitée. Si cela est nécessaire, un vibreur extérieur peut être appliqué contre la paroi du coffrage, pour compacter une éprouvette qui est, soit un prisme, soit un cylindre, pour un essai de compression. La préoccupation principale est d'éviter de forcer l'orientation des fibres pendant la préparation des éprouvettes de faible dimension.

Comme pour le béton classique, le coefficient de variation, le nombre d'essais accomplis et l'écart-type (dans une gâchée, et d'une gâchée à l'autre) sont des paramètres utiles de contrôle ou d'assurance de la qualité.

Testing should follow recommendations similar to those published by the American Concrete Institute [1]. The most important tests for quality assurance are workability, flexural strength, and compressive strength. Workability has been defined differently by several authorities and test methods, but it is simply that property of fresh concrete which determines the ability for mixing, handling, transporting, and placing the concrete with a minimum loss of homogeneity. The workability test is a measure of how difficult this is to accomplish. The standard American Society for Testing and Materials (ASTM) slump test is a common, fast, and economical test for conventional concrete, but unfortunately it is not particularly useful for fibrous concrete. It can be used as a quick indicator of relative uniformity for FRC, but the result must be evaluated with caution. The Vebe test is a good method of measuring workability in FRC, but unfortunately it is not convenient for field work. An "inverted cone" [1, 3] has been used successfully to measure and visually observe how the mix flows when subjected to internal vibration. This test measures the length of time required for the concrete to flow through the restricted opening of an inverted slump cone while subjected to the action of an internal vibrator.

Compressive strength is seldom the most important design parameter for FRC. However, compressive strength tests are important to maintain control of the basic mix. The tests will identify problems developing with aggregates, water-cement ratios, cement, etc., just as they do with conventional concrete.

Because fibers have little effect on compressive strength, this test will not indicate if a problem is developing with the fiber itself. The flexural beam and toughness tests will, however, clearly show how the fiber portion of the concrete is performing. Another test that is a valuable quality assurance indicator for FRC is the impact test [1, 2, 14].

Sample preparation is critical in FRC testing. The appropriate procedures outlined in ASTM C1018 (1985) [2] and by ACI Committee 544 (1978) [1] should be followed. Whenever possible, samples should be made using external vibration. Internal vibration is acceptable in many cases, but rodding should be avoided. When necessary, an external vibrator can be held against the side of a form to provide consolidation of a compressive cylinder or beam specimen. The main concern should be to avoid forcing fiber orientation during preparation in test specimens for the typically small or confined volume/area configurations in which they are cast.

As with conventional concrete, the coefficient of variation, number of tests performed, and standard deviation (within batch. and from batch to batch) are useful quality control or assurance tools.

10 — REFERENCES

- [1] ACI Committee 544, « Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.2R-78) », American Concrete Institute, *Proceedings* V. 75, No. 7, July 1978, pp. 283-289.
 - [2] ASTM C1018, « Flexural Toughness and First Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete », *Standards for Concrete and Mineral Aggregates*, Vol. 04.02, No. C1018, American Society for Testing and Materials, 1985.
 - [3] ASTM C995, « Test Method for Time of Flow of Fiber-Reinforced Concrete Through Inverted Slump Cone », *Standards for Concrete and Mineral Aggregates*, Vol. 04.02, No. C995, American Society for Testing and Materials, 1986.
 - [4] Batson, G.; Jenkins, E.; and Spatney, R., « Steel Fibers as Shear Reinforcement in Beams », American Concrete Institute Journal, *Proceedings*, Vol. 69, No. 10, October 1972, pp. 640-644.
 - [5] Branshaug, T.; Ramakrishnan, V.; Coyle, W.; and Schrader, E., « A Comparative Evaluation of Concrete Reinforced with Straight Steel Fibers and Collated Fibers with Deformed Ends », Report SDSMNT-CBS-No. 7801, South Dakota School of Mines and Technology, Rapid City, South Dakota, May 1978.
 - [6] *Concrete International*, « State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete », Vol. 4, No. 5, May 1982.
 - [7] *Concrete International*, « State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Shotcrete », December 1984.
 - [8] Heneger, C.H., « Technology and Uses of Steel Fibrous Shotcrete, State of the Art Report », Batelle Northwest, Richland, Washington, September 20, 1977.
 - [9] Hoff, G.; Fontenot, C.; and Tom, J., « Selected Bibliography of Fiber-Reinforced Cement and Concrete », *Miscellaneous Paper C-76-6*, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, June 1976.
 - [10] Hoff, G.; Fontenot, C.; and Tom, J., « Selected Bibliography on Fiber-Reinforced Cement and Concrete », *Suppl. 1 to Miscellaneous Paper C-76-6*, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, September 1977.
 - [11] Hoff, George, « Selected Bibliography on Fiber-Reinforced Cement and Concrete », *Supl. 2 to Miscellaneous Paper C-76-6*, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, June 1979.
 - [12] Houghton, D.L. « Determining Tensile Strain Capacity of Mass Concrete », American Concrete Institute Journal, *Proceedings*, Vol. 73, No. 12, December 1976, pp. 691-700.
 - [13] Houghton, D.L.; Borge, O.E.; and Paxton, J.H., « Cavitation Resistance of Some Special Concretes », American Concrete Institute Journal, *Proceedings*, Vol. 75, No. 12, December 1978, pp. 664-667.
 - [14] Johnson, C.D., « Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete », *Proceedings*, USA-Sweden Joint Seminar, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden, June 1985.
 - [15] Kaden, R. A., « Fiber Reinforced Shotcrete », Engineering Foundation Conference on Shotcrete for Ground Support, Easton, Maryland, 1976.
 - [16] Liu, T.C., and McDonald, J.E., « Abrasion-Erosion Resistance of Fiber-Reinforced Concrete », *Cement, Concrete, and Aggregates*, CCAGDP, Vol. 3, No. 2, 1981.
 - [17] Rettburg, W.A., « Steel-Reinforced Concrete Makes Older Dam Safer, More Reliable », *Hydro. Review*, Spring 1986, pp. 18-21.
 - [18] Rice, J.L., « Fibrous Concrete Pavement Design Summary », U.S. Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Lab, Champaign, Illinois, April 1972a.
-

- [19] Rice, J.L., « Proposed Design Criteria for Fibrous Concrete Pavement », Report S-5, U.S. Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Lab, Champaign, Illinois, April 1972b.
- [20] Schrader, E.K., - « Deterioration and Repairs of Navigation Lock Wall Concrete », American Concrete Institute Volume SP-65, *Performance of Concrete in Marine Environments*, August 1980.
- [21] Schrader, E.K., « Impact Resistance and Test Procedure for Concrete », *Journal of the American Concrete Institute*, March-April 1981.
- [22] Schrader, E.K., « Studies in the Behavior of Fiber-Reinforced Concrete », Master's Thesis, Clarkson College of Technology, Potsdam, New York, April 1971, pp. 112-120.
- [23] Schrader E.K., « The Use of Polymers in Concrete to Resist Cavitation/Erosion Damage », *Proceedings*, 2nd International Congress on Polymers in Concrete, College of Engineering, University of Texas, Austin, 1978, pp. 283-309.
- [24] Schrader, E.K., and Kaden, R., « Fibrous Concrete Repair of Cavitation Damage », *Journal of the Construction Division*, Vol. 102, CO 2, American Society of Civil Engineers, June 1976a, pp. 385-399.
- [25] Schrader, E.K., and Kaden, R., « Outlet Repairs at Dworshak Dam », *The Military Engineer*, Vol. 68, No. 443, May-June 1976b, pp. 254-259.
- [26] Schrader, E.K., and Kaden, R., « Stilling Basin Repairs at Dworshak Dam », *The Military Engineer*, Vol. 68, No. 444, May-June 1976c, pp. 282-286.
- [27] Tatro, S.B., « The Effect of Steel Fibers on the Toughness Properties of Large Aggregate Concrete », Master's Thesis, Purdue University, Lafayette, Indiana, 1985.
- [28] USCOLD, « Cavitation and Erosion at Dworshak », U.S. Commission on Large Dams, *Newsletter*, November 1975.

Photocomposition et impression
IMPRIMERIE LOUIS-JEAN
BP 87 — 05002 GAP
Tél. : 92.51.35.23
Dépôt légal : 71 — Janvier 1989
Imprimé en France

ISSN 0534-8293

Copyright © ICOLD - CIGB

Archives informatisées en ligne  *Computerized Archives on line*

***The General Secretary / Le Secrétaire Général :
André Bergeret - 2004***



**International Commission on Large Dams
Commission Internationale des Grands Barrages
151 Bd Haussmann -PARIS -75008**
<http://www.icold-cigb.net> ; <http://www.icold-cigb.org>