

Glass Fibre Reinforced Cement.  
-----

Informations à l'intention des ingénieurs des constructions.

I. PROPRIETES MECANIQUES.  
-----

Peut-être parce que l'application principale de ce matériau est la fabrication de panneaux minces, les propriétés mécaniques du GRC sont évaluées par l'essai de flexion ( 4 points ) sur éprouvette rectangulaire dont la longueur dépend de l'épaisseur. Sur le diagramme charge - déplacement, on relève la charge à partir de laquelle la proportionnalité disparaît, ainsi que la charge maximum. A partir de ces deux charges on calcule, par la théorie élastique, les deux contraintes représentant le comportement du matériau; la limite de proportionnalité ( LDP, ou LOP ) et le module de rupture ( MDR, ou MOR ), voir fig. 1. On relève également l'allongement correspondant à la rupture. On n'a donc pas, de cette manière, accès au vrai diagramme contrainte déformation. Le MDR calculé intègre le comportement non linéaire du matériau.

On peut retenir quelques faits importants qui se dégagent de cet essai de flexion;

1. Le GRC est moins ductile que le béton armé de fibres d'acier. On observe des déformations à la ruine qui dépassent rarement 1%. Sur le diagramme charge - déplacement de l'essai de flexion, la phase descendante est quasi inexistante. Ce comportement fragile est surtout très marqué lorsque le matériau a vieilli ( voir point 2 ci-dessous ).

Le manque de ductilité peut être attribué au type de ruine, celle-ci se produisant surtout par rupture plutôt que par pull out des fibres.

==> Le GRC sera surtout utilisé pour des applications où on veut pouvoir compter, lors du dimensionnement, sur une certaine valeur de la résistance en traction ( 4 à 8 N/mm<sup>2</sup> ).

2. Le GRC est un matériau qui subit un vieillissement très marqué. Au fil du temps, on constate que le MDR diminue, alors que le module d'élasticité et la LDP ont tendance à augmenter avec le temps ( voir fig. 1.).

L'attaque chimique des fibres, même si elles sont spécialement conçues, par les alcalis du ciment pourrait expliquer le premier phénomène. Il semble cependant que le phénomène le plus important soit la formation lente de certains composés chimiques (  $CA(OH)_2$  ) qui s'immiscent entre les fibres des petits torons et renforcent l'adhérence entre chaque fibre et celle entre le toron et la matrice ( plus, mais ce n'est pas certain, indentation des fibres et fragilisation supplémentaire). Le composite est ainsi rendu plus rigide et son domaine de proportionnalité augmente, mais le phénomène de pull out, qui apportait la ductilité, n'est plus possible. Cela est confirmé par les vues microscopiques des zones de rupture ( voir fig. 2. ). De nombreux efforts sont entrepris pour développer des ciments moins agressifs destinés à la fabrication du GRC.

==> Le vieillissement étant surtout marqué lorsque la température et l'humidité sont élevées, on se base sur ce fait pour réaliser des essais de vieillissement accélérés.

On considère par exemple que, pour le climat de la Grande Bretagne;

1 jour dans l'eau à 80°C = +- 1672 jours d'exposition réelle,
" " " 70°C 693 " " " ,
" " " 60°C 272 " " " ,
" " " 50°C 101 " " " .

3. Les résultats sont moins élevés s'ils sont réalisés sur des échantillons humides, surtout lorsque la composition intègre un adjuvant acrylique.

==> On se basera sur des résultats provenant d'échantillons mouillés si le matériau doit être utilisé dans des conditions où il est soumis à la pluie.

## II. COMPARAISON ENTRE METHODES DE MISES EN OEUVRE.

---

1. Projection au pistolet ( manuel ou automatique ) + compactage au moyen d'un rouleau.

Composition type : 5/5

s/c = 1 ( parfois 0.5 ).

Fibres AR ( 12 à 38 mm ); 5% du poids total.

Polymère acrylique ( FORTON ); 5% ( max. 12% ) en volume, par rapport au ciment.

e/c = 0.3

N.B. Les verres alcalis-resistant ( AR glass ) ont une composition chimique spéciale ( zirconium,.. ), plus une protection de surface, qui les différencie des verres classiques au borosilicate (E-glass ) utilisés dans les premières applications du GRC.

Ordre de grandeur des propriétés mécaniques ( mélange 5/5, s/c = 1 ).

	28 jours		âgé	
	moyenne	caract.	moyenne	caract.
LDP (N/mm <sup>2</sup> )	11	7	14	10
MDR (N/mm <sup>2</sup> )	25	19	20	15
epsilon MDR (%)	.9	.5	.5	.3
dilatation (10 <sup>-6</sup> /K)	15		15	
contrainte admissible en flexion (N/mm <sup>2</sup> )				6

Avantages.

- permet des formes compliquées,
- hautes teneurs en fibres => ép. de panneaux: 10 à 12 mm, 25 kg/m<sup>2</sup>.

Inconvénients.

- beaucoup de main d'oeuvre spécialisée,
- pertes de matière,
- difficulté de garantir l'épaisseur minimale et de contrôler la composition.

## 2. Coulé-vibré ( = premix ).

Composition type : 3/7

$$s/c = 1$$

Fibres AR ( 12 mm maxi ); 3% du poids total.

Polymère acrylique ( FORTON ); 7% ( max. 10% ) en volume, par rapport au ciment.

$$e/c = 0.36$$

Ordre de grandeur des propriétés mécaniques ( mélange 3/7, s/c = 1 ).

	28 jours		agé	
	moyenne	caract.	moyenne	caract.
LDP (N/mm <sup>2</sup> )	11	8	13	9
MDR (N/mm <sup>2</sup> )	15	12	14	10
E (N/mm <sup>2</sup> )	10.000 à 20.000			
epsilon MDR (%)	.5	.3	.3	.2
dilatation (10 <sup>-6</sup> /K)	15		15	
contrainte admissible en flexion (N/mm <sup>2</sup> )				4

### Avantages.

- épaisseur et composition bien contrôlées,
- vibration => excellents états de surface.

### Inconvénients.

- s'applique à des formes simples, sinon le moule devient compliqué, parfois nécessité de contre-moule,
- développement plus lent des résistances => attention lors du démoulage,
- moins de fibres => + 20 à 25 % d'épaisseur pour les panneaux.

### III. EFFETS DE L'INCORPORATION D'ADJUVANT ACRYLIQUE.

-----

- Permet de bas rapport e/c.
- Réduit et simplifie la cure.
- Donne de meilleures valeurs de la LDP à 28 jours.
- Améliore la durabilité.
- Basse porosité (réduit les mouvements à l'humidité, l'absorption d'eau, la perméabilité à la vapeur).

#### Attention

à la combustibilité,  
à la réduction du module d'élasticité,  
au fait que les différences de résistance entre état sec et état mouillé deviennent plus sensibles lorsque la teneur en adjuvant augmente.

N.B. Coût des matières pour fabriquer le GFRC: +- 2.3 FF/kg selon une étude réalisée en France en 1991. S'il s'agit de panneaux de façade, compter sur +- 3 fois autant pour la main d'oeuvre, les moules et les réparations à effectuer.

### IV. STUD-FRAME CLADDING.

-----

Sans conteste l'application la plus courante du GFRC.

Il s'agit d'un système formant l'enveloppe extérieure d'un bâtiment à l'aide d'éléments constitués d'une feuille mince en GFRC fixée sur un cadre léger en acier prenant lui-même appui sur l'ossature portante du bâtiment ( voir fig. 3.).

L'utilisation du GRC donne des panneaux plus légers de 20% par rapport au béton préfabriqué, ce qui réduit les coûts de transport, les contraintes sur les grues, les charges sur la structure et sur les fondations. De plus, la grande variété d'états de surface et de formes laissent une grande liberté architecturale.

Aux U.S.A., le cadre est en acier galvanisé et les soudures sont repeintes. Dans certains pays, on impose un cadre ( et des fixations par boulons ) en acier inoxydable. Si on place un matériau isolant derrière

la feuille de GRC, il faut maintenir un espace entre l'isolant et le GRC afin de permettre une circulation d'air. Une conception saine devrait toujours permettre l'inspection des différentes fixations par l'intérieur du bâtiment, sans devoir enlever le panneau.

Quelques considérations à propos du design.

Les charges à considérer sont ( voir [1], par ex. );

- la pression ou la dépression due au vent- les charges de neige, le poids des vitrages appuyés,
- les forces causées par les mouvements sismiques,
- le poids propre ( au démoulage, durant le transport, durant le montage et en service),  $1900 \text{ kg/m}^3$  à  $2250 \text{ kg/m}^3$  dans l'état sec,
- les mouvements dus au retrait initial (  $\pm 0.2\%$  ), aux effets thermiques, aux variations d'humidité(  $\pm 0.1\%$  à  $0.15\%$  ), voir fig. 4.

L'ensemble du système peut se révéler fortement hyperstatique.

- La structure portante du bâtiment ( poutre de rive, par ex. ) possède sa propre flexibilité, dont il faut tenir compte si le nombre de fixations du cadre sur cette structure est surabondant.
- Le cadre métallique possède sa flexibilité propre.
- La plaque de GRC, fixée en plusieurs points sur le cadre, possède également sa propre rigidité.

Cette hyperstaticité se manifeste dans le plan de la façade, pour les forces de gravité ou les forces sismiques, ou perpendiculairement à ce plan pour la pression du vent et les mouvements de la plaque de GRC.

Pour mieux maîtriser le cheminement des efforts, on conçoit deux types de fixations différents. Les fixations rigides ( gravity anchors, voir fig. 5. ) qui reprennent essentiellement les forces de gravité, et les fixations flexibles ( flex anchors ), espacées de  $\pm 600 \text{ mm}$  dans les deux directions, qui reprennent les charges hors plan ( voir fig. 6. ). Pour la pression du vent, on obtient alors  $M^- = 0.65 \times p l^2 / 8$ , repris à 75% dans la zone des appuis,

On lève habituellement l'hyperstaticité entre le cadre et la structure en ne plaçant que le nombre nécessaire de fixations de ce type. Par exemple deux fixations de gravité placées à  $1/5$  de la longueur du

cadre. De la sorte, cependant, on concentre les réactions en deux points localisés ce qui nécessite souvent un renforcement du cadre pour les longueurs habituellement rencontrées de  $\pm 6\text{m}$  ( voir fig. 7 ).

Si on utilise des cornières horizontales fixées en plusieurs endroits à la structure ( voir fig. 8. ), ou si on fixe à la structure chaque montant vertical du cadre, celui-ci peut être allégé mais le système est de nouveau hyperstatique.

Si la rigidité verticale du cadre est comparable à celle de la peau en GRC, chaque fixation de gravité peau-cadre supporte la même charge. Ce cadre doit présenter une certaine rigidité hors plan pour résister à la flexion qui lui est occasionnée par le retrait de la peau. Comme les fixations qui reprennent les efforts hors plan ont une grande flexibilité dans le plan, il n'est pas possible de compter sur la peau pour collaborer avec le cadre dans sa flexion hors plan, ni pour le rigidifier dans son plan.

Philosophie du design selon P.C.I.[3]

On observe que le MDR d'un GRC âgé ne descend jamais sous la valeur de la LDP à 28 jours ( voir fig. 9 ). Le principe du calcul est de garantir un certain rapport entre les contraintes, que l'on calcule élastiquement, résultant des résultats d'essai à 28 jours et les contraintes causées par les charges pondérées.

On recommande un rapport de 1.5 pour la plastification, 2.5 pour la fissuration, 4 pour les déformations excessive et 4 à 6 pour la ruine.

Philosophie néerlandaise.

Basée sur la limitation des déformations ( voir [4] ).

V. BIBLIOGRAPHIE.

-----  
[1] DESIGN CONSIDERATIONS FOR GFRC FACADE PANELS.....

D.M. Schultz, J.I. Daniel, and R.G. Oesterle  
6th biennial congress of the G.R.C.A., 1987

[2] GLASS FIBRE REINFORCED CEMENT

A.J. Majumdar and V. Laws.  
Oxford, BSP Professional Books, 1991.

[3] RECOMMENDED PRACTICE FOR GLASS FIBER REINFORCED CONCRETE PANELS  
Prestressed Concrete Institute, 1987

[4] DUTCH STUPRE DESIGN RULES FOR ARCHITECTURAL PANELS IN GRC .....

J.N.J.A. Vambersky  
7th biennial congress of the G.R.C.A., 1989

GLASSFIBRE REINFORCED CEMENT ASSOCIATION

107 Standishgate. Wigan. WN1 1XL. Grande Bretagne

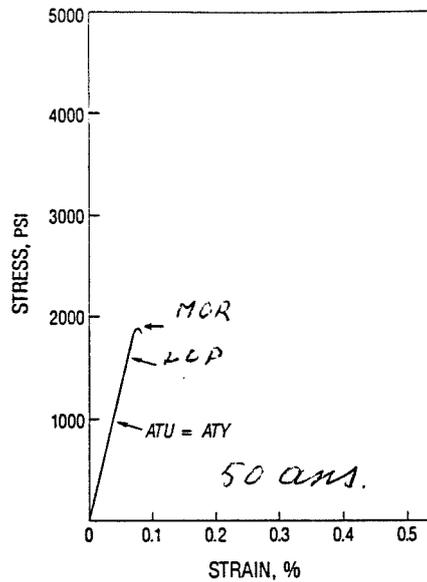
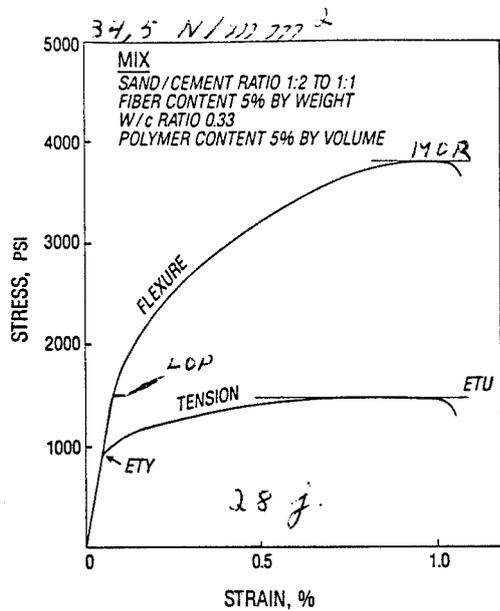
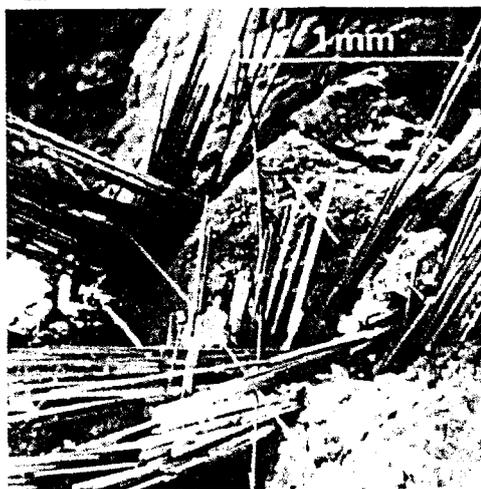
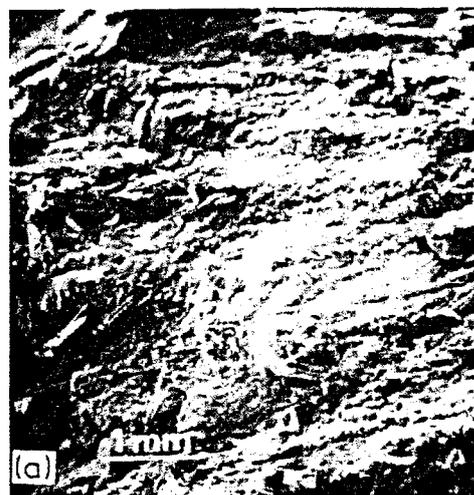


FIG. 7.



DUCTILE



FRAGILE

FIG. 2.

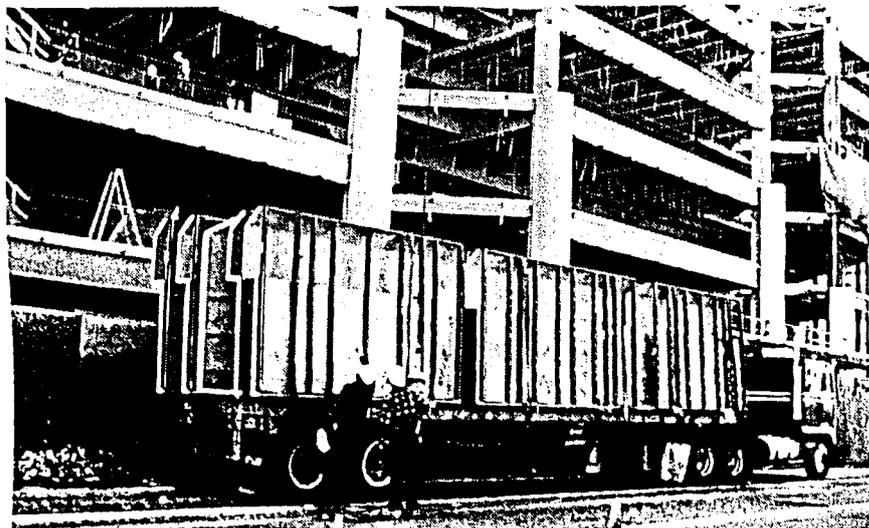


FIG. 3.

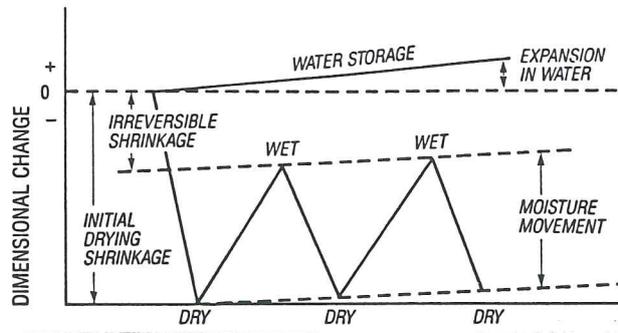


FIG. 4.

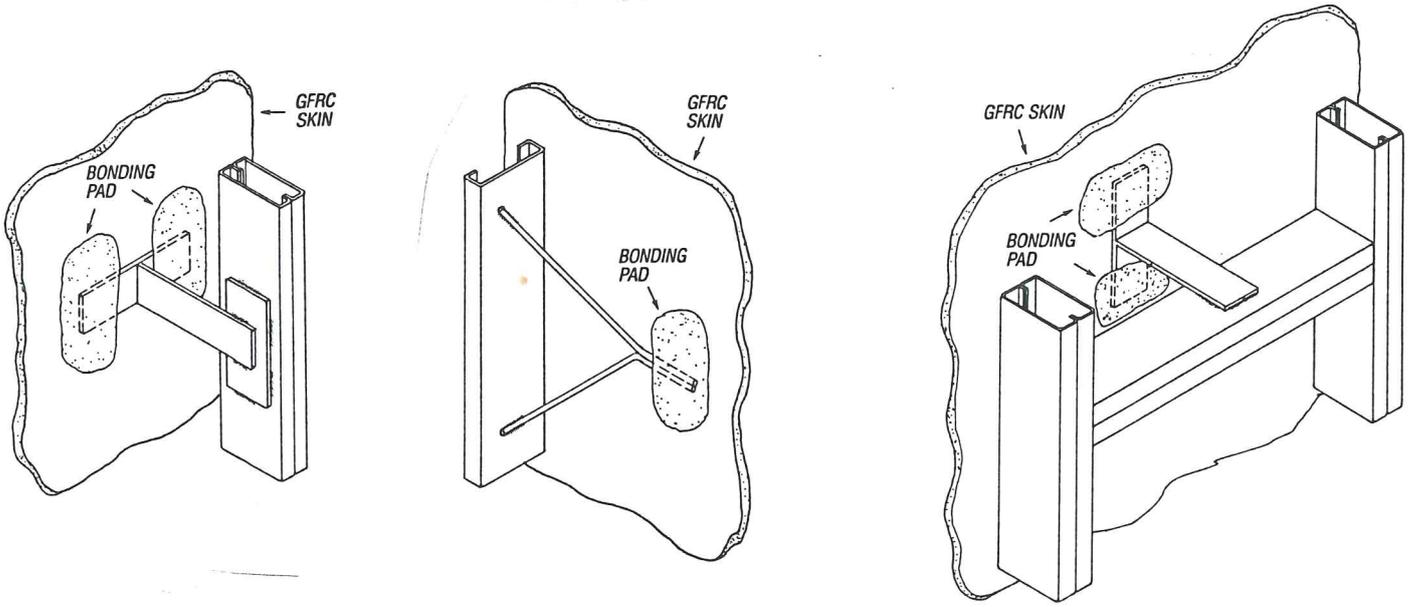


FIG. 5.

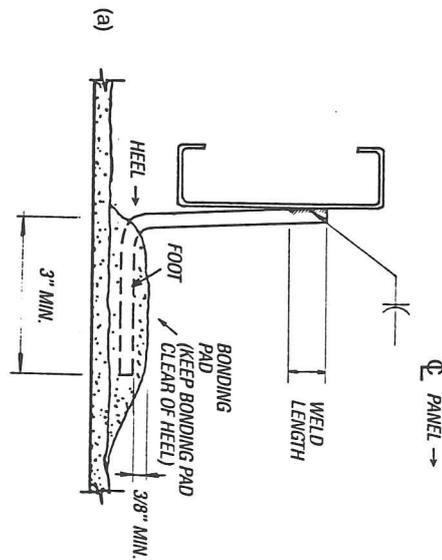


FIG. 6.

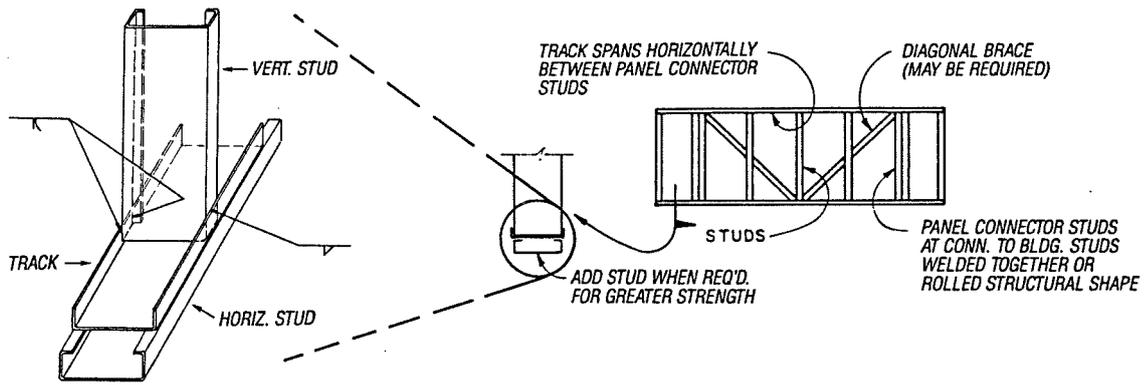


FIG. 7.

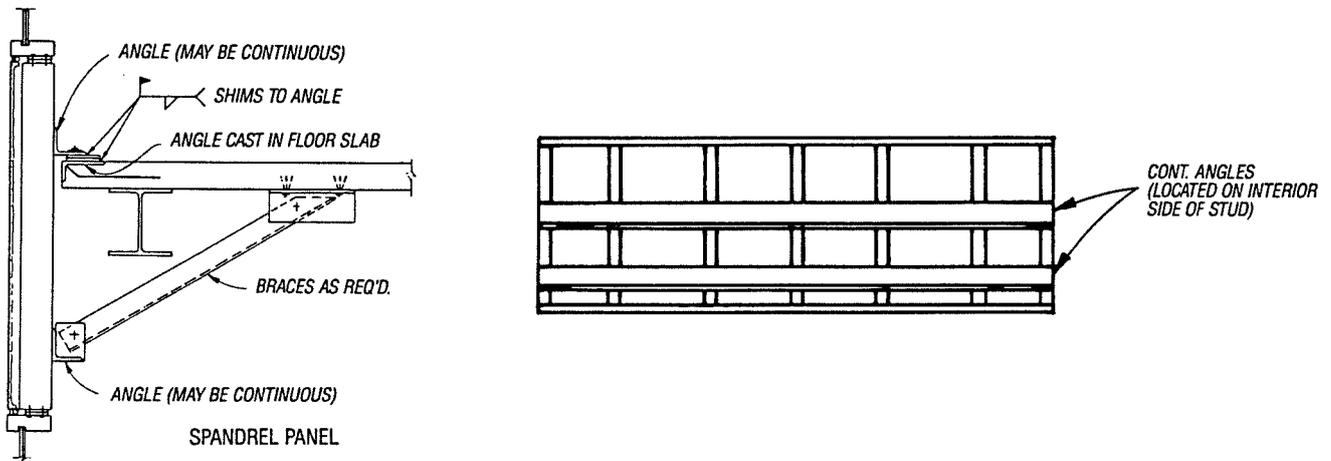


FIG. 8

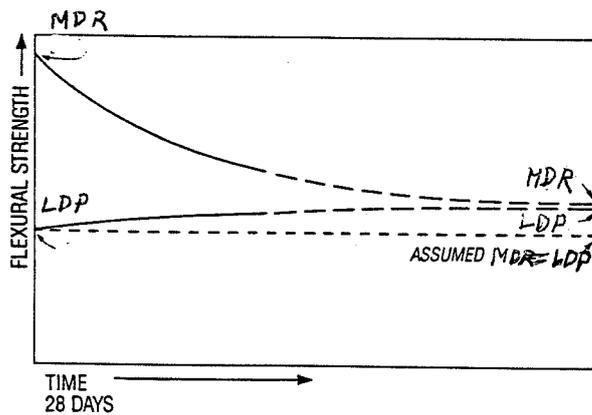


FIG. 9.