



Painéis pré-fabricados em GRC

JOAO RAFAEL BRAGA GUIMARAES

dezembro de 2016

DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS PRÉ-FABRICADOS EM GRC

JOÃO RAFAEL BRAGA GUIMARÃES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE CONSTRUÇÕES

Orientador: José Carlos de Almeida Gouveia Lello

Co-Orientador: Eduardo Ioshimoto (Mackenzie)

DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS PRÉ-FABRICADOS EM GRC

JOÃO RAFAEL BRAGA GUIMARÃES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE CONSTRUÇÕES

Orientador: José Carlos de Almeida Gouveia Lello

Co-Orientador: Eduardo Ioshimoto (Mackenzie)

OUTUBRO DE 2016

ÍNDICE GERAL

Resumo.....	v
Abstract	vii
Agradecimentos	ix
Índice de Texto	xi
Índice de Figuras.....	xv
Índice de Tabelas.....	xvii
Abreviaturas	xix
1 Introdução.....	1
2 Cimento reforçado com fibra de vidro (GRC)	3
3 Painéis pré-fabricados de fachada em GRC	32
4 Estudo de caso: dimensionamento de painéis pré-fabricados em grc para vedação de um edifício. 49	
5 Considerações finais.....	58
Referências Bibliográficas	60
ANEXOS	63
Anexo I – Planta de forma do edifício	63
Anexo II – Vista frontal/lateral	63
Anexo III – Detalhamento do painel.....	63
Anexo IV – Tabela de propriedades geométricas.....	63

RESUMO

A presente dissertação foi elaborada no âmbito da unidade curricular de DIPRE (Dissertação/Projeto/Estágio), que se encontra no plano de estudos do 2º semestre do 2º ano do Mestrado em Engenharia Civil, no ramo de Construções do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Novos sistemas de vedação de fachadas, como os painéis pré-fabricados em GRC, vem ganhando relevância no mercado da construção civil por conta da conscientização da implementação de métodos menos agressivos ao meio ambiente e da necessidade de racionalização da obra, o que inclui a redução do tempo de execução e custos.

No Brasil, existe uma grande resistência à substituição do método convencional fechamento de fachadas, realizado com blocos de alvenaria. Esta resistência se deve a pouca oferta de mão de obra especializada e a carência de estudos técnicos e normatizações de sistemas inovadores, como os painéis pré-fabricados em GRC.

Este trabalho sintetiza o conhecimento em torno deste método, procurando esclarecer as etapas do processo de projeto, fabricação e montagem dos painéis. Após a exposição das propriedades do GRC, dos tipos de painéis, das formas de produção, foi feito o dimensionamento de um painel para um edifício fictício, este último realizado dentro do estudo de caso, conclui-se que a prática deste método construtivo pode ser muito benéfica para a construção como um todo, reduzindo o peso imposto na estrutura, assegurando o conforto térmico e acústico da edificação além de reduzir os resíduos da construção, característica assegurada pela pré-fabricação.

Palavras-chave: Painéis arquitetônicos, GRC, sistemas construtivos, fachada, pré-fabricado.

ABSTRACT

This dissertation was prepared in the context of curricular unit of DIPRE (Dissertation/Project/Internship), which is the 2nd semester of the 2nd year of the master's degree in Civil Engineering, in the construction field of the Instituto Superior de Engenharia do Porto.

New sealing facade systems, such as prefabricated panels in GRC, has been reaching relevance in the construction market to the growing awareness of the implementation of less aggressive methods to the environment and the need for rationalization of the work, which includes reducing time and costs.

In Brazil, there is a great resistance to replace conventional method closing facades, made with masonry blocks. This resistance is due to low skilled labor supply and the lack of technical studies and standardizations of innovative systems, such as prefabricated panels in GRC.

This work synthesizes knowledge about this method, seeking to clarify the stages of the design process, manufacturing and assembly of the panels. After exposure of the GRC properties, types of panels, forms of production, the design of a panel for a fictitious building was done, the latter held within the case study, it is concluded that the practice of this construction method can be very beneficial for the construction as a whole, reducing the load imposed on the structure, ensuring thermal and acoustic comfort of the building while reducing construction waste, feature provided by prefabrication.

Keywords: Architectural panels, GRC, building systems, façade, prefabricated.

AGRADECIMENTOS

O espaço limitado dos agradecimentos, não me permitiria agradecer devidamente a todas as pessoas que ao longo da minha graduação e do meu mestrado me ajudaram, direta ou indiretamente, a cumprir os meus objetivos e concluir mais uma etapa da minha formação acadêmica.

ÍNDICE DE TEXTO

1	Introdução.....	1
1.1	Considerações iniciais.....	1
1.2	Objetivos.....	2
2	Cimento reforçado com fibra de vidro (GRC).....	3
2.1	Panorama atual do GRC.....	8
2.2	DOSAGEM DO GRC E MATERIAIS EMPREGADOS.....	12
2.2.1	Cimento.....	12
2.2.2	Água.....	13
2.2.3	Agregados.....	14
2.2.4	Aditivos.....	14
2.2.5	Fibra de vidro.....	15
2.2.6	Pigmentos.....	15
2.2.7	Adições minerais.....	15
2.2.8	Polímeros Acrílico.....	16
2.3	Propriedades físicas e químicas do grc.....	16
2.3.1	Resistência à compressão.....	17
2.3.2	Resistência à flexão.....	18
2.3.3	Resistência à tração.....	19
2.3.4	Resistência à cisalhamento.....	20
2.3.5	Retração.....	20

ÍNDICE DE TEXTO

2.3.6	Resistência ao impacto	23
2.3.7	Resistência ao fogo	23
2.3.8	Resistência à abrasão.....	24
2.3.9	Densidade, absorção de água e permeabilidade.....	24
2.3.10	Condutividade térmica	25
2.3.11	Isolamento acústico.....	26
2.4	Processo produtivo do GRC	27
2.4.1	Spray-up.....	27
2.4.2	Premix.....	29
2.5	A cura do GRC	30
2.5.1	Cura úmida.....	30
2.5.2	Cura seca.....	31
3	Painéis pré-fabricados de fachada em GRC	32
3.1	Tipos de painel e suas ligações	32
3.1.1	Painel skin	32
3.1.2	Painel skin nervurado	33
3.1.3	Painel skin com stud frame.....	34
3.1.4	Painel sanduíche	36
3.2	Método de dimensionamento	37
3.2.1	Princípios de projeto.....	37
3.2.2	Fatores parciais de segurança	40
3.2.3	Estado limite último.....	40
3.2.4	Estado limite de serviço.....	43
3.2.5	Tensões térmicas e retração.....	43
3.2.6	Flexão.....	45
3.2.7	Cisalhamento	45
3.2.8	Resumo do roteiro de cálculo para ELU e ELS	46

4	Estudo de caso: dimensionamento de painéis pré-fabricados em grc para vedação de um edifício.	49
4.1	Introdução.....	49
4.2	Dados da estrutura	49
4.3	Dimensionamento do painel.....	50
4.4	Verificação para o estado limite último.....	51
4.4.1	Determinar carga característica	52
4.4.2	Fatores parciais de segurança	52
4.4.3	Fatores da carga de cálculo	52
4.4.4	Determinar carga de cálculo.....	52
4.4.5	Características geométricas.....	53
4.4.6	Calcular tensão à flexão.....	53
4.4.7	Fator da resistência de cálculo	53
4.4.8	Determinação das tensões térmica e de retração	54
4.4.9	Cálculo do módulo de ruptura aos 28 dias (MOR_{28d})	54
4.4.10	Cálculo da força cortante V_u	54
4.4.11	Cálculo de tensão de cisalhamento	54
4.4.12	Verificar tensão de cisalhamento permitida	54
4.5	Verificação para o estado limite de serviço.....	55
4.5.1	Determinar carga de cálculo.....	55
4.5.2	Fator global de segurança	55
4.5.3	Cálculo da tensão à flexão	55
4.5.4	Determinação das tensões térmica e de retração	56
4.5.5	Cálculo do limite de proporcionalidade aos 28 dias (LOP_{28d})	56
4.5.6	Verificação da flecha.....	56
4.6	Resultado e discussão	57
5	Considerações finais.....	58
5.1	CONCLUSÕES	58

ÍNDICE DE TEXTO

5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação esquemática do comportamento à flexão de um concreto convencional e um concreto reforçado com fibra (Mehta; Monteiro, 2008)	3
Figura 2.2 - Diferença do tamanho da fibra de vidro e da fibra de amianto (Comino, Romero, 2007)	5
Figura 2.3 – Equação da deterioração da fibra de vidro do tipo E em ambiente alcalino (Bentur, Mindess, 2007)	6
Figura 2.4 – Comparação do comportamento da fibra de vidro “E” e da fibra de vidro AR em ambiente alcalino da matriz do cimento (GRCA, 2015)	7
Figura 2.5 – Composição química das fibras de vidro AR e E (BENTUR; MINDESS, 2007)	8
Figura 2.6 - O efeito da composição do vidro na tensão de escoamento das fibras após a exposição a solução de cimento Portland (pH = 13,4) a 70C (BENTUR; MINDESS, 2007)	8
Figura 2.7 – Peças pré-fabricadas em GRC usadas na construção da Catedral da Sé (Construtora Concrejacto, 2002 apud FACCIO, 2004)	9
Figura 2.8 – Painéis pré-fabricados em GRC com texturas diferentes (REGÁS; BOLAÑOS, 2007)	10
Figura 2.9 – Painel sanduíche pré-fabricado em GRC com poliestireno expandido (esquerda) e barreiras acústicas em rodovia na Espanha fabricadas com GRC (direita) (REGÁS; BOLAÑOS, 2007)	11
Figura 2.10 – Casas pré-fabricadas integralmente em GRC (esquerda) e painéis pré-fabricados em GRC sendo transportados por guas (direita) (REGÁS; BOLAÑOS, 2007)	11
Figura 2.11 – Areias com diferentes características utilizadas na fabricação de GRC (REGÁS; BOLAÑOS, 2007)	14
Figura 2.12 – Resistência à flexão e curva carga/deflexão (GRCA, 2015)	17
Figura 2.13 - Curva de carga/deformação (ABNT, 2005)	18
Figura 2.14 - Comportamento do GRC em relação a variações de umidade do meio externo (SILVA, 1998)	21

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.15 - Influência do teor de areia na retração (SILVA, 1998)	22
Figura 2.16 - Condutividade térmica do GRC (Cem-Fil Ltd., 1999)	26
Figura 2.17 - Curva da redução do som / peso painel de GRC (Cem-Fil Ltd., 1999).....	27
Figura 2.18 - Fibra álcali resistente em rolo (esquerda) e pistola spray up (direita) (Acervo próprio)	28
Figura 2.19 - Sequencia de mistura para o método spray up (adaptado de OCV REINFORCEMENTS, 2008)	28
Figura 2.20 - Esquema do bico utilizado na aspersão direta (spray up) (BENTUR;MINDESS, 1990 apud SILVA, 1998)	29
Figura 3.1 – Esquema do painel skin nervurado (Cem-Fil Ltd., 1999)	33
Figura 3.2 – Esquema do bastidor tubular e os conectores (REGÁS; BOLAÑOS, 2007)	35
Figura 3.3 – Esquema dos conectores intercalados em no máximo 60 centímetros (esquerda) e esquema do conector anti-gravidade (direita) (REGÁS; BOLAÑOS, 2007)	35
Figura 3.4 – Inclusão do isolante térmico no painel sanduíche (esquerda) e o painel pronto (direita) (Acervo próprio)	36
Figura 3.5 – Esquema do painel sanduíche (Cem-Fil Ltd., 1999).....	37
Figura 3.6 – Curva de Gauss (GRCA, 2015)	38
Figura 3.7 - Curva de Gauss para carga de cálculo (GRCA, 2015).....	39
Figura 3.8 - Curva de Gauss para resistência de cálculo (GRCA, 2015)	40
Figura 3.9 – As resistências do GRC no decorrer do tempo (GRCA, 2015).....	45
Figura 3.10 – Tipos de cisalhamento estudados no GRC (GRCA, 2015)	46
Figura 3.11 – Fluxograma de cálculo no ELU (adaptado de GRCA, 2015)	47
Figura 3.12 – Fluxograma de cálculo no ELS (adaptado de GRCA, 2015)	48
Figura 4.1 - Detalhe do painel na estrutura e suas dimensões (Acervo próprio).....	50
Figura 4.2 - Detalhamento do painel de GRC com cortes da seção transversal (Acervo próprio)	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resistência à compressão (Cem-Fil Ltd., 1999).	18
Tabela 2.2 - Resistência à flexão do GRC aos 28 dias (GRCA, 2015).	19
Tabela 2.3 - Resistência à tração (GRCA, 2015).	20
Tabela 2.4 - Resistência ao cisalhamento (GRCA, 2015).	20
Tabela 2.5 - Resistência ao impacto aos 28 dias (GRCA, 2015).	23
Tabela 2.6 - Redução de volume pelo processo de abrasão em jato de areia (Adaptado de Cem-Fil Ltd., 1999).	24
Tabela 2.7 - Densidade aparente seca do GRC (Cem-Fil Ltd., 1999)	25
Tabela 3.1 - Tabela para definir $\alpha'f$ (adaptado de GRCA, 2015).	41
Tabela 3.2 – Valores típicos para determinação de γ_{tv} para ELU (adaptado de GRCA, 2015)	42
Tabela 3.3 – Tabela 10: Valores típicos para γ_b no ELU (adaptado de GRCA, 2015)	42
Tabela 3.4 – Valores típicos para α_m no ELU (adaptado de GRCA, 2015).	43
Tabela 3.5 – Valores sugeridos para Tensão de retração (σ_{ss}) em N/mm ² (adaptado de GRCA, 2015)... ..	44
Tabela 3.6 - Valores sugeridos para tensão térmica (σ_{ts}) em N/mm ² (adaptado de GRCA, 2015).	44
Tabela 4.1 - Dados da estrutura	50

ABREVIATURAS

2CaOSiO_2 – silicato bicálcico

$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ – aluminato tricálcico

3CaOSiO_2 – silicato tricálcico

$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ – ferro-aluminato tetracálcico

a/c – relação água cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Abrainc – Associação Brasileira de Incorporadoras

Al_2O_3 – óxido de alumínio

AR – Álcali Resistente

AR – Fibra de vidro álcali resistente

ASTM - American Society for Testing and Materials

BOP - curvatura sobre o ponto de tração

BRE – British Research Establishment

C – notação simplificada do óxido de cálcio

C_2S – silicato bicálcico

C_3A – aluminato tricálcico

C_3S – silicato tricálcico

$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_8$ – silicato de cálcio hidratado

C_4AF – ferro-aluminato tetracálcico

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ – hidróxido de cálcio

CaO – Cal

ABREVIATURAS

CH – hidróxido de Cálcio

CO₂ – dióxido de carbono

CP V – ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

E – Fibra de vidro de Boro

E – módulo de elasticidade

ε - deformação específica linear

F_d – carga de cálculo

f_d – resistência de cálculo

FIPE – Fundação Instituto Pesquisas Econômicas

F_k – carga característica

f_k – resistência característica

Gel C-S-H – silicato de cálcio hidratado

GFRC – Glass Fiber Reinforced Cement

GPa – Giga Pascal

GRC – Glass Reinforced Cement

I - inércia

LOP – Limite de proporcionalidade

LOP_{28d} – Limite de proporcionalidade aos 28 dias

MOR – Módulo de ruptura

MOR_{28d} – Módulo de ruptura aos 28 dias

MPa – Mega Pascal

N – Newton

N/mm² – Newton por milímetro quadrado

NBR – Norma Brasileira Registrada

OH- - símbolo íons para hidroxila

pH – potencial de hidrogênio

SiO₂ – Dióxido de silício

UTS – estado de colapso

V_u – força cortante

W – módulo resistente

Zr – Símbolo para zircônio

μm – micrometro

v – tensão de cisalhamento

σ_{bs} – tensão à flexão no estado limite de serviço

σ_{bu} – tensão à flexão no estado limite último

σ_{ss} – tensão de movimento térmico

σ_{ts} – tensão de retração

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os próximos anos serão de extrema importância para o setor da construção civil, que enfrentará desafios na racionalização da obra como redução de trabalho, de desperdício, de reposição, de esforço, ou seja, chegar ao fim da etapa com o melhor custo benefício.

Para atingir este objetivo as empresas deverão buscar a modernização de seus processos construtivos, contrariando velhos paradigmas da construção. Simultaneamente a este cenário, a indústria de pré-fabricado necessita responder a este desafio, oferecendo novas soluções às construtoras.

A norma NBR 9062 – Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado (ABNT, 2006) define estrutura pré-fabricada como elemento pré-moldado executado industrialmente, em instalações permanentes de empresa destinada para este fim, que se enquadram e atendem aos requisitos mínimos das especificações relativos à matéria-prima, a controle de produção da fábrica, os elementos são produzidos com auxílio de máquinas e de equipamentos que racionalizam e qualifica o processo, depois de produzidos os elementos são submetidos a um processo de cura com temperatura controlada, os elementos devem ser identificados individualmente e, quando conveniente, por lotes de produção e por último na inspeção e no controle de qualidade dos elementos, devem ser utilizados as especificações e os métodos de ensaios das Normas Brasileiras pertinentes.

A aptidão de desenvolvimento rápido das soluções pré-fabricadas é o fator primordial no prazo de execução da construção e entrega ao cliente final, facilitando o ganho de ambos os lados, permitindo uma redução de custos em mão-de-obra e mobilização de equipamentos.

O GFRC (Glass Fiber Reinforced Cement) ou GRC (Glass Reinforced Cement) aplicado nos painéis de fachada é um produto com grande potencial de crescimento na construção civil, pois pode propiciar as construtoras uma alternativa ao fechamento de alvenaria convencional. Basicamente, o GRC é uma argamassa reforçada com fibras de vidro álcali resistente, que permitem a peça projetada diversas formas com pequenas espessuras.

Frente à alvenaria convencional, o GRC pode agregar beleza, qualidade e velocidade na instalação. Tudo isso devido a sua pré-fabricação em fábrica, que permite projetar e executar o produto com maior

CAPÍTULO 1

controle de qualidade. Além disso, os painéis pré-fabricados em GRC podem conter isolantes térmicos e acústicos, conforme as condicionantes de projeto.

No âmbito sustentável, o painel pré-fabricado em GRC se sobressai em relação à vedação convencional de alvenaria devido a racionalização da fabricação, reduzindo o desperdício de materiais e a quantidade de entulho. Além disso, conforme Vahidi e Malekabadi (2011) “A fibra de vidro oferece um comprovado desempenho térmico e acústico”. Portanto, o GRC é naturalmente um isolante térmico e acústico, contribuindo para a sustentabilidade da construção.

O painel pré-fabricado de fachada pode oferecer rapidez e agilidade na vedação da construção, tornando viável a construção de grandes empreendimentos em um tempo de execução reduzido, o que antes era dificilmente alcançado quando utilizado métodos tradicionais, tanto para a elevação da fachada com blocos de vedação, como para a execução do seu revestimento.

Portanto, os painéis pré-fabricados têm grande potencial em diminuir o custo da obra com a redução do tempo de execução proporcionada pela rápida instalação. Além de obter um melhor aproveitamento de recursos naturais, pois diminui o desperdício e o volume de entulho. Aliado também, a uma maior durabilidade a fachada, pois com sua fabricação controlada, garante um vasto controle de qualidade, assegurando a vida útil para qual foi projetada.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como propósito avaliar os critérios de projeto e fabricação de painéis pré-fabricados em GRC. Analisar as particularidades da produção do GRC, considerando-se suas propriedades no estado fresco e endurecido. Estudar o sistema de fabricação destes painéis pré-fabricados e avaliar o método de dimensionamento, ilustrando um caso prático.

No capítulo 2 será abordado o contexto histórico da utilização das fibras em matrizes cimentícias, o panorama atual do GRC como as suas propriedades físicas e químicas, os tipos de painel e os métodos produtivos. O capítulo 3 abrange os tipos de painéis pré-fabricados em GRC e os seus respectivos métodos de produção e dimensionamento. O capítulo 4 expõe o estudo de caso, que é o dimensionamento de um painel pré-fabricado em GRC. Já o capítulo esclarece a conclusão e os possíveis desenvolvimentos futuros para o tema.

2 CIMENTO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO (GRC)

O concreto simples, sem aço, é um produto frágil com baixa resistência à tração, por este motivo é adicionada em sua composição um material dúctil, como o aço, formando assim o concreto armado. Por sua vez, o aço sofre corrosão em presença de umidade, e quem faz essa proteção é o concreto, com um revestimento mínimo entre a superfície externa e as barras de aço.

A ductilidade é uma propriedade mecânica do material medida pela capacidade de deformação plástica antes da ruptura. O material não dúctil, como o concreto simples, não se deforma plasticamente antes da ruptura, ou seja, não avisa antes de romper. Por isso é chamado de frágil. A ductilidade pode ser expressa por meio do alongamento ou da redução da área (estricção).

Este compósito formado pelo concreto e o aço poderá ser dimensionado para a ruptura dúctil, ao invés da ruptura frágil. Quando estiver próximo da ruptura o aço se deforma e apresenta um padrão elevado de fissuras na peça, que é um mecanismo de aviso do material dúctil. Portanto, é importante garantir ao concreto propriedade dúctil, visto que ter-se-á um aviso prévio da ruptura e um tempo de se efetuar o reparo necessário.

Além disso, o concreto tem como sua melhor característica a resistência à compressão, porém não se deve considerar o mesmo para as resistências à flexão e tração. O elemento que supre essa característica no concreto armado é o aço.

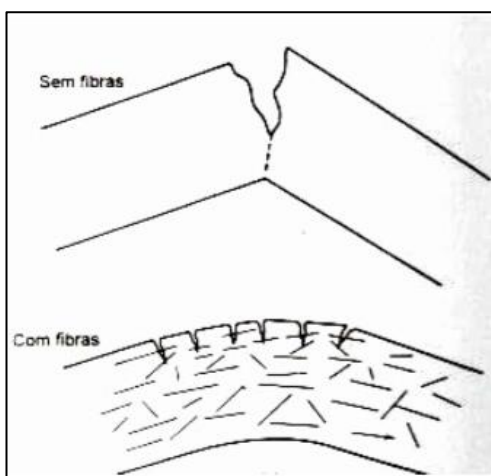


Figura 2.1 – Representação esquemática do comportamento à flexão de um concreto convencional e um concreto reforçado com fibra (Mehta; Monteiro, 2008)

CAPÍTULO 2

Para elementos de fachadas arquitetônicas torna-se complicada a utilização do concreto armado, devido ao aço precisar de um revestimento mínimo de proteção enquanto estes elementos necessitam ser demasiadamente finos. Por este motivo foi preciso estudar alternativas para reforçar a matriz cimentícia, como a adição de fibras.

As matrizes cimentícias com adição de fibras têm sua capacidade de suporte de carga melhorada, principalmente quando submetida a esforços de tração, flexo-tração e impacto (OLIVEIRA, 1995, apud PERUZZI, 2002).

A produção massiva de componentes com espessura reduzida vem sendo perseguida desde o advento do concreto armado, material que mostra-se limitado para uso nessas aplicações. A adição de fibras permite a conformação de componentes esbeltos sem prejuízo de resistência mecânica e, ao compor um reforço distribuído ao longo de toda a matriz, eleva notavelmente a resistência à fissuração. (SILVA, 1998)

Segundo Bentur e Mindess (2007), o fibrocimento foi o primeiro compósito que tinha a matriz cimentícia reforçada com fibra de amianto, foi amplamente usado como material de revestimento, para unidades de tetos e paredes. As fibras de amianto são feitas de minerais fibrosos cristalinos, consistindo em feixes de filamentos, estes filamentos são finos tal como 0,1µm ou menos. Durante os anos 1960 e 1970, tornou-se evidente que as fibras de amianto apresentavam riscos de saúde. Devido ao seu pequeno tamanho, mostrado na figura 2.2, elas poderiam ser inaladas até o pulmão. Em vista desse risco a produção de compósitos de fibrocimento foi proibida na maioria dos países.

Por um longo período de tempo a indústria de fibrocimento firmou-se como um dos maiores consumidores do cimento produzido na Europa. Portanto, com a proibição da utilização das fibras de amianto a indústria cimenteira necessitava encontrar uma solução para que aquela indústria continuasse a produzir os seus compósitos de fibra com cimento. Visando garantir o volume de vendas, a indústria cimenteira conduziu o desenvolvimento de pesquisas com todas as fibras então disponíveis no mercado (Cem-FIL Ltd., 1995, apud SILVA, 1998).

Nesta procura de um reforço capaz de produzir um material compósito com excelente desempenho, muitas experiências foram desenvolvidas com outras fibras, tanto de origem orgânica (aramida, nylon, polipropileno, ...) e inorgânico (boro, carbono, ferro, aço, alumínio, ...). De todas estas o melhor custo-benefício encontrado foi a fibra de vidro. Com propriedades mecânicas aceitáveis e características interessantes indispensáveis como não sofrer corrosão e ser inócuo (COMINO; ROMERO, 2007).

As fibras de vidro têm incombustibilidade, flexibilidade e propriedades mecânicas semelhantes às das fibras de amianto, com a vantagem adicional de serem produzidas de modo econômico - e em quaisquer comprimentos - a partir de materiais facilmente disponíveis em todo o mundo. (SILVA, 1998)

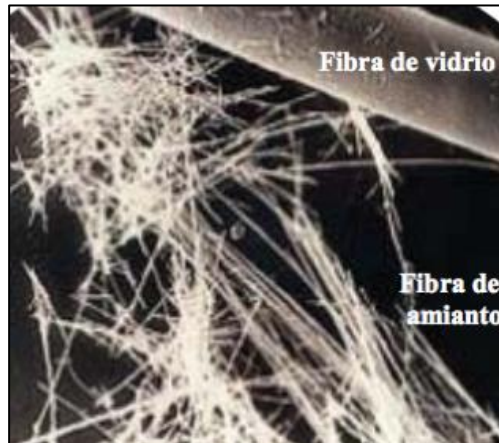


Figura 2.2 - Diferença do tamanho da fibra de vidro e da fibra de amianto (Comino, Romero, 2007)

Os primeiros ensaios e experiências para o reforço de cimentos e argamassas foram feitos com fibras de vidro tipo "E" (normalmente utilizado para o reforço de plásticos e poliésteres), dada a elevada resistência a elas inerentes. No entanto, estas tentativas falharam, porque este tipo de fibra de vidro ao ser incorporada a argamassa estava sujeita ao ataque químico dos cristais alcalinos produzidos no processo de hidratação do cimento (COMINO; ROMERO, 2007).

Um particular problema que também teve de ser tratado foi a baixa resistividade alcalina das fibras de vidro E, o que é o tipo de vidro comumente utilizado para reforçar plásticos, e que foi originalmente usado para GRC. Este tipo de fibras deteriora-se muito rapidamente no ambiente altamente alcalino da matriz de cimento. Para ultrapassar este problema, as formulações de vidro resistente aos álcalis especiais (fibras de vidro AR) tiveram que ser desenvolvidas. (Bentur, Mindess, 2007)

A fibra de vidro tipo E (elétrico), [...], tem inadequada resistência ao meio alcalino da matriz de cimento Portland, causando uma deterioração das propriedades mecânicas e fazendo com que a fibra de vidro convencional perca sua flexibilidade e sua resistência à tração, o que fragiliza todo o compósito. (Peruzzi, 2002)

Como a matriz do cimento continua seu processo de cura ao longo dos anos, os cristais de Ca(OH)_2 se formam sobre e ao redor dos fios de fibra de vidro, fazendo com que a fibra de vidro perca sua flexibilidade, e conseqüentemente do compósito (PURNELL, 2001, apud PERUZZI, 2002).

A fibra de vidro E sofre um rápido processo de deterioração, perdendo seu diâmetro e resistência. Este processo pode ser explicado pela quebra da ligação Si-O-Si, causada pelos íons OH^- , muito concentrados em soluções alcalinas, como afirmam Bentur e Mindess (2007). Como pode ser visto na figura 2.3.

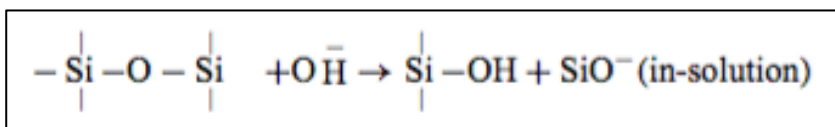


Figura 2.3 – Equação da deterioração da fibra de vidro do tipo E em ambiente alcalino (Bentur, Mindess, 2007)

Foram estudados diversos recursos a fim de controlar o ataque alcalino à fibra de vidro, entre eles acelerar a carbonatação da matriz de cimento Portland, conforme afirmou Silva (1998). A carbonatação consiste na penetração do dióxido de carbono nos poros da matriz de cimento, que reage com o hidróxido de cálcio (pH = 12,5), formando carbonato de cálcio (pH = 9,4). Portanto esta reação diminui o pH da matriz do cimento, favorecendo a proteção às fibras de vidro, como é ilustrado na equação 1.

Essa redução resulta das reações entre o dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera e os produtos de hidratação do cimento, na presença de umidade. Como resultado tem-se a redução do pH do concreto, originalmente maior que 12,5, para valores em torno de 8,5 (BAKKER, 1988, MEHTA e MONTEIRO, 2008, apud POSSAN, 2010).



Outro recurso que foi utilizado para reduzir a alcalinidade da matriz do cimento foi a utilização de adições como a microsílca, escória de alto forno, cinza volante, metacaulim, entre outras. Estas adições tem atividade pozolânica, segundo Priskulnik (2011) “A atividade pozolânica corresponde, portanto, à capacidade que um material em pó apresenta de reagir com o hidróxido de cálcio – Ca(OH)₂ – em presença de umidade, à temperatura ambiente.”.

Portanto, esta capacidade que o material pozolânico tem, de através do dióxido de silício reagir com o hidróxido de cálcio se mostra muito benéfica para a matriz de cimento reforçada com fibra de vidro, pois consome a componente alcalina do compósito formando silicato de cálcio hidratado, reduzindo o seu pH, como podemos ver na equação 2.



Entretanto, a utilização em grande escala de fibra de vidro aconteceu apenas quando os pesquisadores do BRE (British Reserach Establishment) desenvolveram uma fibra de vidro resistente ao ambiente alcalino da matriz cimentícia, conhecida como fibra de vidro álcali resistente (AR).

Para resistir ao ambiente alcalino da matriz do cimento, foi necessário a incorporação de aproximadamente 16% de zircônio na composição do vidro. A implementação de zircônio na composição produziu um sistema mais estável, pois ao contrário das ligações Si-O, a ligação Zr-O sofre pouco ataque dos íons OH⁻. Como podemos ver na figura 2.4.

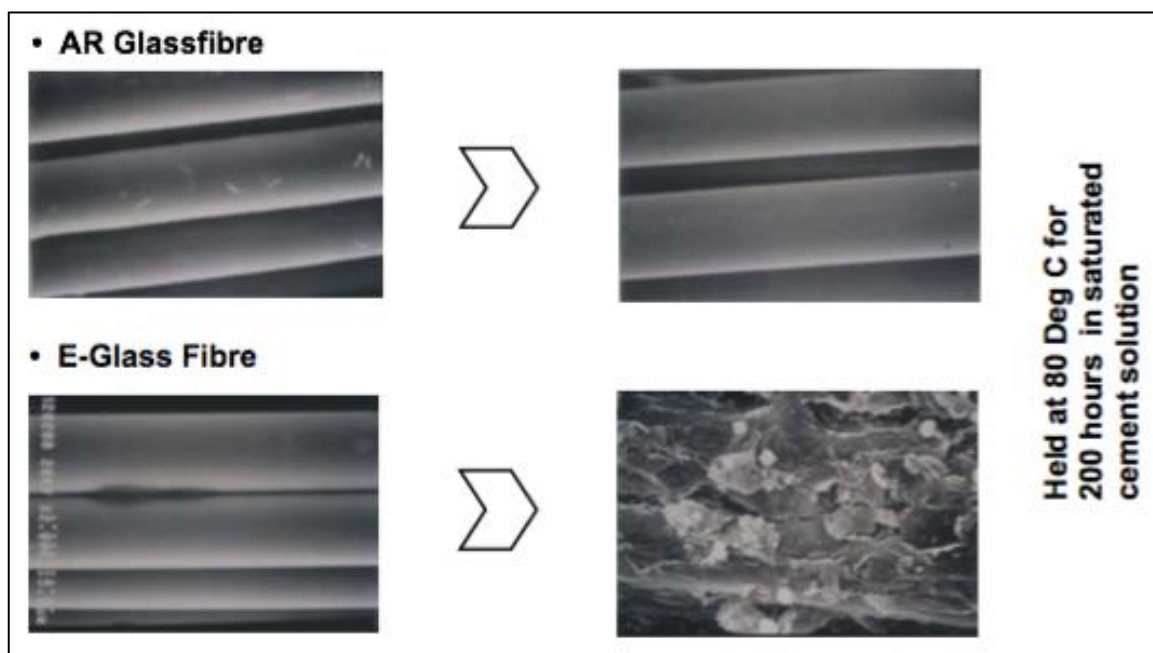


Figura 2.4 – Comparação do comportamento da fibra de vidro “E” e da fibra de vidro AR em ambiente alcalino da matriz do cimento (GRCA, 2015)

No vidro AR, existe da mesma forma as ligações de óxido de silício, mas na sua superfície são incorporados adicionalmente átomos de Zr, e por isso existem ligações de óxido de zircônio. Estes átomos têm um tamanho e uma polaridade muito diferente ao silício ou ao resto dos outros átomos presentes na superfície. [...] O Zr tem orbital eletrônico de maior nível energético do que contém o silício, e por isso os elétrons desemparelhados da hidrólise podem ser acomodados no mesmo. Assim, o átomo de Zr comporta-se como um “captura moscas”, bloqueando os ânions em torno dele, evitando que as ligações hidrolisáveis sejam atacadas.” (Comino, Romero, 2007)

Com a modificação da composição da fibra de vidro foi possível frear o ataque dos íons OH⁻ em sua estrutura, possibilitando a manutenção de seu diâmetro e sua resistência, como podemos ver nas figuras 2.5 e 2.6.

	E glass	AR glass
SiO ₂	52.4%	71%
K ₂ O + Na ₂ O	0.8	11
B ₂ O ₃	10.4	—
Al ₂ O ₃	14.4	18
MgO	5.2	—
CaO	16.6	—
ZrO ₂	—	16
Li ₂ O	—	1

Figura 2.5 – Composição química das fibras de vidro AR e E (BENTUR; MINDESS, 2007)

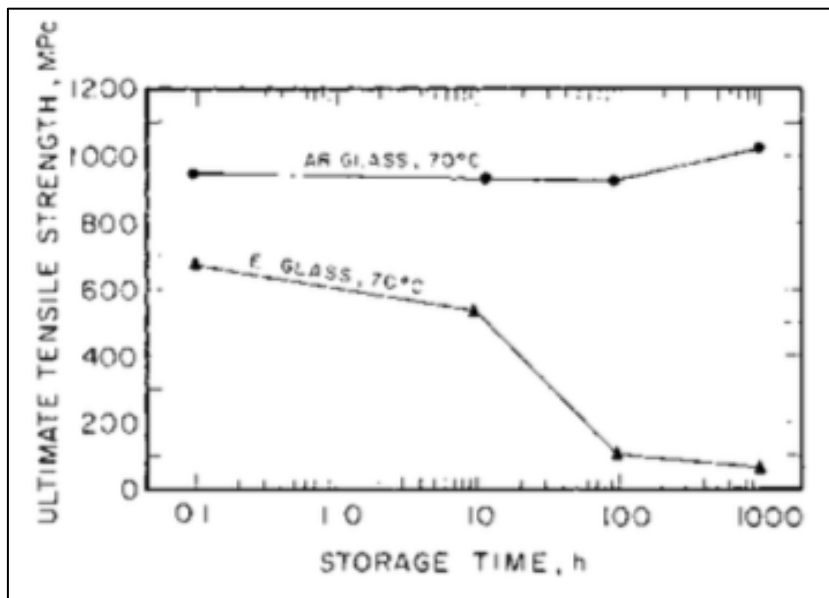


Figura 2.6 - O efeito da composição do vidro na tensão de escoamento das fibras após a exposição a solução de cimento Portland (pH = 13,4) a 70C (BENTUR; MINDESS, 2007)

2.1 PANORAMA ATUAL DO GRC

O GRC (Glass Reinforced Concrete) é um material composto por cimento Portland, areia, fibra de vidro álcali resistente e água, ou seja, uma argamassa reforçada com fibras de vidro. Na fabricação do GRC podem ser adicionados aditivos que possam diminuir a relação água e cimento mantendo a fluidez da mistura, conforme especificação de projeto.

A incorporação de fibras dúcteis, como as de vidro, em matrizes de aglomerantes minerais tem objetivo semelhante ao do uso de barras de aço no concreto armado, isto é, melhorar algumas propriedades mecânicas dessas matrizes e contornar o problema de sua ruptura frágil.

Diferentemente do que acontece no concreto armado, onde o posicionamento da armadura atende basicamente às regiões submetidas a tração, este reforço dá-se aleatoriamente ao longo de toda a matriz, propiciando o aumento e estabilização da tensão de fissuração da matriz na tração e na flexão, além do aumento sensível de tenacidade do compósito decorrente da ampliação da capacidade de suporte de carga da matriz após a sua fissuração. (Proctor, 1990; PCI, 1994, apud Silva, 1998)

Por estas razões o GRC é utilizado para a produção de componentes de extremamente finos, que podem assumir uma forma relativamente simples, tais como painéis planos ou nervurados, ou um painel em forma complexa. Formas complexas podem ser prontamente fabricadas devido a resistência suficientemente elevada à tração e a tenacidade proporcionadas pelas fibras (BENTUR; MINDESS, 2007).

O GRC se apresenta para os arquitetos e engenheiros como um material versátil que pode viabilizar projetos ambiciosos de fachada. Ele pode ser moldado para formar desenhos futuristas modernos ou para replicar características históricas tradicionais, como pode ser visto na figura a seguir. O GRC pode ser colorido e ficar com um acabamento liso ou com textura natural.



Figura 2.7 – Peças pré-fabricadas em GRC usadas na construção da Catedral da Sé (Construtora Concrejacto, 2002 apud FACCIO, 2004)

Devido a sua versatilidade, o GRC é um dos materiais mais utilizados para criativas fachadas pré-fabricadas de revestimento arquitetônico. A capacidade do GRC para ser moldado em placas finas, com uma ampla variedade de formas e acabamentos da superfície tem sido apreciada por um público cada vez maior de arquitetos e engenheiros em todo o mundo, dois exemplos de painéis podem ser vistos na figura 2.8.

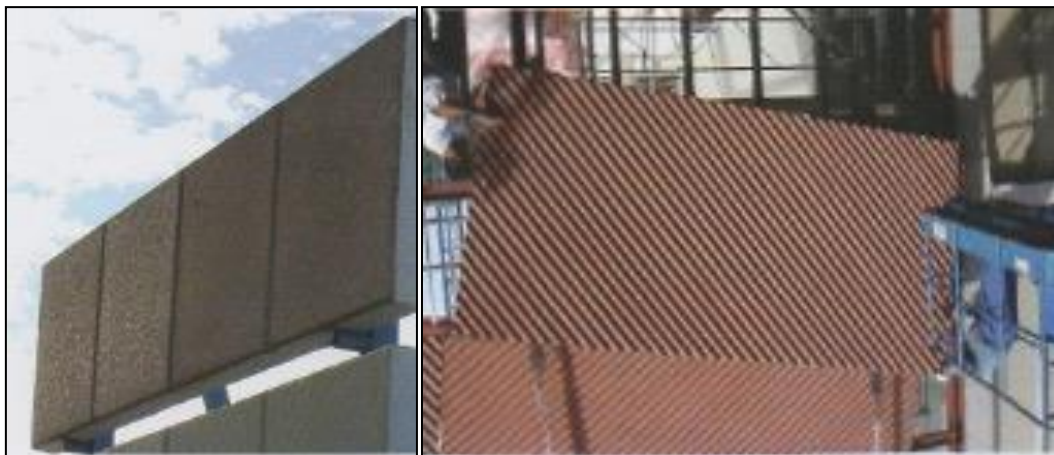


Figura 2.8 – Painéis pré-fabricados em GRC com texturas diferentes (REGÁS; BOLAÑOS, 2007)

O GRC é usado para produzir belas molduras e características arquitetônicas. Este produto mantém-se fácil de manusear, pois é muito mais leve do que o concreto convencional, permitindo ao arquiteto ou ao engenheiro uma liberdade inigualável para o design criativo. O GRC não requer um mínimo de recobrimento, por conta de sua composição não conter aço, portanto não sofre corrosão como o concreto armado.

Nos últimos anos, a necessidade para produzir componentes de construção de peso mais leves levou a significativos avanços na utilização de elementos pré-fabricados em GRC. Construtoras de todo o mundo estão estudando o ganho de tempo na velocidade que os elementos pré-fabricados em GRC podem proporcionar a obra.

GRC é um material ideal para a reabilitação de edifícios. Painéis leves e finos são fáceis de manusear, além de minimizar o peso imposto a estrutura existente. Em muitos casos a intervenção é feita não só para melhorar a estética do edifício, mas também para melhorar as propriedades térmicas e acústicas, visto que os elementos pré-fabricados em GRC podem receber isolantes térmicos e acústicos em sua composição, como o poliestireno expandido.

O GRC pode incorporar paredes de isolamento térmico, se necessário, ilustrado na figura 2.9. Enquanto a ausência de aço pode ser um benefício para as instalações elétricas e hidráulicas, principalmente quando se trata de reformas.

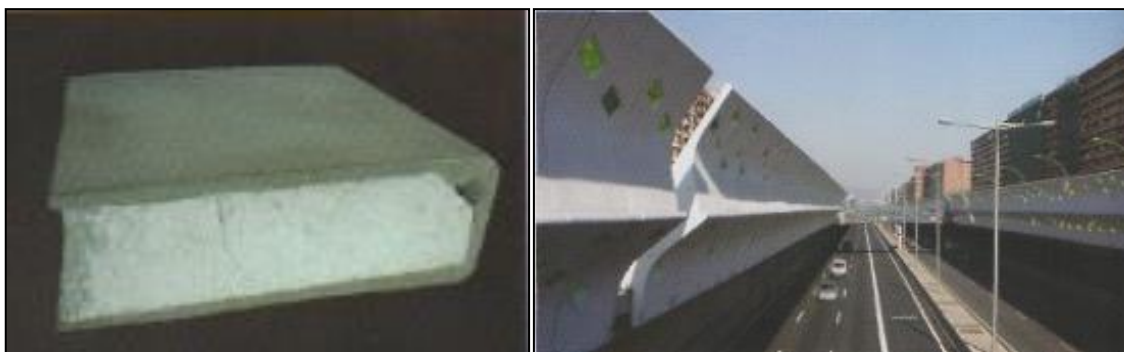


Figura 2.9 – Painel sanduíche pré-fabricado em GRC com poliestireno expandido (esquerda) e barreiras acústicas em rodovia na Espanha fabricadas com GRC (direita) (REGÁS; BOLAÑOS, 2007)

As qualidades do GRC são mostradas com grande vantagem na área de construção modular, como na figura 2.10, pois painéis de GRC são leves e fáceis de transportar, porém tão resistentes quanto as paredes de alvenaria.

Os produtos fabricados com GRC podem ter a seção transversal relativamente reduzida, devido ao ganho de resistência à tração e à flexão que as fibras de vidro proporcionam. Esta redução acarreta em redução de peso, facilitando o transporte, armazenamento e instalação.

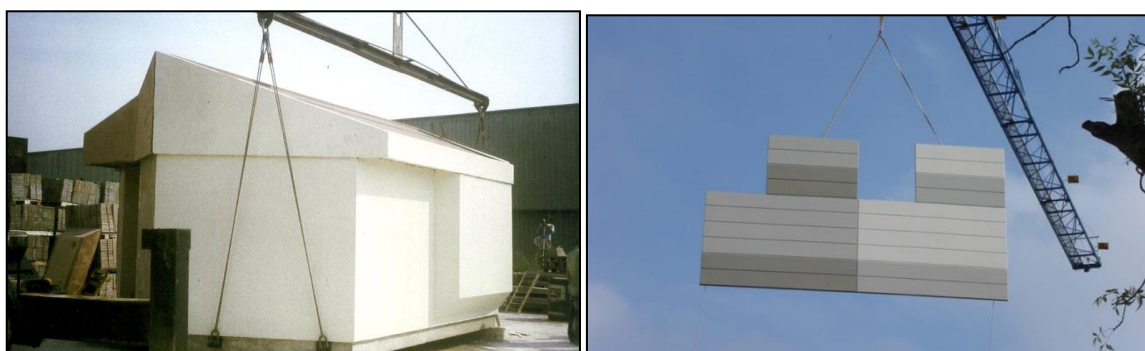


Figura 2.10 – Casas pré-fabricadas integralmente em GRC (esquerda) e painéis pré-fabricados em GRC sendo transportados por guias (direita) (REGÁS; BOLAÑOS, 2007)

A quantidade de fibra de vidro dentro da composição do GRC varia com o método de aplicação, Spray Up e Premix. Tanto o método de fabricação quanto a quantidade de fibra dentro da mistura influenciam as propriedades físicas e químicas do GRC.

2.2 DOSAGEM DO GRC E MATERIAIS EMPREGADOS

A matriz do GRC é, normalmente, composta por uma argamassa de Cimento Portland, areia, fibra de vidro álcali resistente, misturado com uma proporção controlada de água. Porém, dependendo do projeto podem ser adicionados ao compósito aditivos químicos, adições minerais e pigmentos.

A escolha das matérias-primas e do método de produção utilizado, são decididas de acordo com o produto específico e são relacionados com o projeto de engenharia e arquitetura. Um estudo de dosagem deve ser feito almejando obter a melhor mistura, do ponto de vista econômico e mecânico. Devem ser considerados os materiais da região, que atendam os requisitos do projeto. Dentre os requisitos do projeto, podem estar inclusos a resistência, espessura, cor e textura.

A escolha do método de produção influencia diretamente na quantidade de fibra de vidro empregada na mistura. Existem dois métodos comumente usados, o de pré-mistura (premix) e o de projeção simultânea (spray-up). Normalmente, a quantidade de fibras do primeiro método é limitada para não afetar a trabalhabilidade da mistura, pois os componentes são misturados antes do lançamento no molde. Por outro lado, no método de projeção é possível empregar maior quantidade de fibras, pois a fibra entra em contato com a mistura no momento do lançamento, não influenciando a trabalhabilidade.

A quantidade de fibra de vidro álcali-resistente é muito importante do ponto de vista da resistência do compósito GRC. Normalmente as resistências obtidas historicamente com os processos de pré-mistura são menores do que os obtidos pelo processo de projeção simultânea simplesmente por causa da taxa inferior de fibras utilizada (COMINO; ROMERO, 2007).

Portanto, para cada projeto deve ser desenvolvido um estudo de dosagem, pois existem diversas variáveis que influenciam no processo.

2.2.1 Cimento

Cimento é um material seco, finamente pulverizado, que por si só não é um aglomerante, mas desenvolve propriedade aglomerante como resultado de hidratação. [...] O cimento hidráulico mais comumente usado para fazer concreto é o cimento Portland, que consiste essencialmente de silicatos reativos de cálcio. (Mehta, Monteiro, 2014).

O cimento Portland foi patenteado por Joseph Aspdin na Inglaterra, e desde então, é um dos materiais de construção mais utilizados no mundo. No GRC não é diferente, é o componente mais utilizado na mistura, pois cabe a ele aglomerar os materiais e dar resistência ao compósito.

Como afirma Prizskulnik (2011), o cimento é composto basicamente por 4 componentes principais:

a) silicato tricálcico $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$;

- b) silicato bicálcico $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$;
- c) aluminato tricálcico $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$;
- d) ferro-aluminato tetracálcico $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$.

Para simplificar a leitura, é adotada a seguinte notação para os componentes do cimento: C3S, C2S, C3A e C4AF, respectivamente. Cada composto químico contribui de uma forma para as propriedades do concreto. Os silicatos de cálcio influenciam principalmente na resistência à compressão. O C3S tem uma maior influência nas primeiras idades. Depois de 7 dias o C2S começa a reagir com mais ímpeto, desde que se mantenha a cura correta do concreto. Tanto o silicato tricálcico (eq. 3) e o silicato bicálcico (eq. 4) incrementam resistência à compressão devido ao resultado de sua reação química, que em contato com a água forma o silicato de cálcio hidratado ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_8$), que é comumente chamado de gel C-S-H, mais o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). O gel C-S-H é o mais importante composto resultado na reação, pois é o cristal que vai proporcionar resistência a matriz cimentícia.



Para os elementos fabricados em GRC é interessante a utilização de cimentos com maior porcentagem de C3S, que propiciam uma resistência inicial alta, como o CPV-ARI, pois diminui o tempo de espera para desmoldagem, agilizando o processo de produção. Em outros critérios de projeto, não há problemas em utilizar outros cimentos, como o CPII e CPIII, desde que atendam a resistência especificada.

O cimento Portland branco é feito de matérias-primas que contêm pequena quantidade de ferro, por isso a tonalidade branca. É usado no GRC quando é necessário um acabamento colorido ou branco. Outros tipos de cimento, como o resistente a sulfatos podem ser usados em determinadas aplicações e devem atender a norma em vigor. Cuidados devem ser tomados para que a escolha do cimento seja adequada ao produto e que atenda as regulamentações impostas.

É importante que o cimento esteja corretamente armazenado. Este material deve ser mantido seco para que não ocorra hidratação de seus componentes. Até mesmo o ambiente úmido pode ser prejudicial como a umidade direta.as de prevenção.

2.2.2 Água

A água que será empregada na mistura deve ser limpa e isenta de matéria orgânica. Não deve ser utilizado, de maneira alguma, o emprego de água de origem marítima ou de águas salgadas para a mistura de GRC.

2.2.3 Agregados

Segundo Mehta e Monteiro (2014), “Agregado é um material granular, como a areia, pedregulho, pedrisco, rocha britada [...], que é usado com um meio cimentício para produzir concreto ou argamassa.”.

Existem duas definições dentro do termo agregado, o agregado graúdo e o miúdo. O termo agregado graúdo se refere ao material que fica retido na peneira nº 4, que tem abertura de 4,75 mm. Já o agregado miúdo é a partícula que está entre a peneira nº 4 e nº 200 (75µm).

Deve-se usar areia com diâmetro máximo entre 0 e 1 mm para o método de produção de spray-up. Para os casos de fabricação de peças com o método premix se agregam finos cuja granulometria está entre 0 e 2 mm, conforme afirma Regás e Bolaños (2007). Congruente a esta ideia, GRCA (2015) confirma “Para GRC fabricado pelo método de spray-up, o tamanho máximo de partícula é geralmente limitada a 1,2 mm; GRC fabricado pelo método premix, o tamanho máximo de partícula pode ser de apenas 2,4 mm.”. Portanto, no GRC só haverá uso de agregado miúdo.

Preferencialmente deve-se usar areia de origem silícica, mas caso o fornecedor garanta a qualidade, pode-se optar por outras areias, como as de mármore e granito. Uma das razões para escolher esses tipos de areia é a estética. Se o arquiteto deseja uma aparência da superfície da peça que o agregado tenha protagonismo, selecionam-se areias que possam cumprir esse requisito (REGÁS; BOLAÑOS, 2007).



Figura 2.11 – Areias com diferentes características utilizadas na fabricação de GRC (REGÁS; BOLAÑOS, 2007)

2.2.4 Aditivos

Aditivo é qualquer produto que seja adicionado ao concreto, em pó ou líquido, que seja dosado em menos de 5% do peso do cimento e que acrescente propriedades ao concreto diferente das que a adição proporciona.

O uso de aditivos, tais como plastificantes e superplastificantes, é válida uma vez que podem melhorar as propriedades do GRC. Tanto os aditivos para concreto padrão ou aditivos especialmente desenvolvidos

para a fabricação de GRC podem ser utilizados. Os aditivos são geralmente adicionados a mistura para produzir os seguintes efeitos na fabricação do GRC:

- aumento da capacidade de trabalho sem aumentar a relação água / cimento
- melhorar a coesão
- reduz a segregação
- reduz a exsudação
- retardar o processo de endurecimento
- acelerar o processo de endurecimento
- incremento na resistência inicial
- diminuindo a permeabilidade

2.2.5 Fibra de vidro

As fibras de vidro AR são filamentos produzidos a partir de zircônio, altamente duráveis dentro de um compósito de base cimentícia por suas características álcali-resistente. Em seu uso para produção de GRC seu comprimento varia entre 12 mm e 35 mm, dependendo do método empregado. Para o método de spray-up é utilizado comprimento de 30 a 35 mm. Já para o método premix são utilizadas fibras no comprimento de 12 mm.

2.2.6 Pigmentos

Pigmentos em pó podem ser usados para produzir GRC colorido. Os pigmentos são normalmente óxido de ferro e devem estar em conformidade com normas nacionais ou internacionais (GRCA, 2015).

Os pigmentos devem ser de origem inorgânica e nunca superar a proporção de 6% em relação ao peso do cimento (REGÁS, BOLAÑOS, 2007).

2.2.7 Adições minerais

Adição mineral é qualquer material que seja adicionado no concreto à exceção do cimento, agregados graúdo e miúdo e a água. A adição mineral é o produto que tem atividade pozolânica, ou seja, condição de reagir com o hidróxido de cálcio em presença de umidade.

As primeiras pozolanas foram utilizadas pelos antigos romanos, há mais de 2000 anos, com o emprego das lavas vulcânicas expelidas pelo Vesúvio, na região de Pozzuoli, ao sul de Roma. Estas lavas eram misturadas à cal hidratada (aglomerante aéreo, de baixa resistência à ação da água), resultando um aglomerante hidráulico, com elevada durabilidade. Priszkulnik (2011).

Portanto, desde a antiguidade já se percebia o benefício destas adições. No Brasil existem diversos tipos de adição mineral, como o Metacaulim, Cinza Volante, Escória de Alto Forno e a Microsílica.

Para o GRC o benefício das adições minerais é proporcionado pela redução do pH da matriz cimentícia, pois o seu componente mais expressivo, dióxido de silício (SiO_2), reage com o hidróxido de cálcio (componente alcalino) formando os silicatos, e reduzindo a alcalinidade do compósito. Pois mesmo com a invenção das fibras álcali resistentes, estas ainda sofrem a longo prazo com a alcalinidade da matriz.

2.2.8 Polímeros Acrílico

Produtos derivados de cimento necessitam permanecer úmidos, para não perderem água para o ambiente e continuarem a hidratação dos componentes cimentícios. O tempo de cura recomendado é de 7 dias, o que é muito complicado na rotina de uma fábrica, pelo espaço e tempo de estoque. Portanto os polímeros acrílicos são adicionados à mistura do GRC para permitirem uma cura subsequente seca e redução das fissuras de superfície (GRCA, 2015).

Quando os polímeros acrílicos são adicionados à dosagem, uma película é formada no interior da matriz de cimento, durante as primeiras horas de cura. A formação desse filme reduz significativamente a permeabilidade e, assim, diminui a perda de água para o ambiente, assegurando a quantidade de água para a hidratação do cimento (GRCA, 2015).

2.3 PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DO GRC

O GRC não é um material único e suas propriedades podem variar para se adequar à utilização final. O processo de estudo de dosagem deve reconhecer isso e escolher a composição do GRC com base nas propriedades físicas especificadas em projeto. As propriedades físicas do GRC são dependentes da composição da lama de cimento, o teor de fibras, o método de fabricação e a cura empregada (GRCA, 2015).

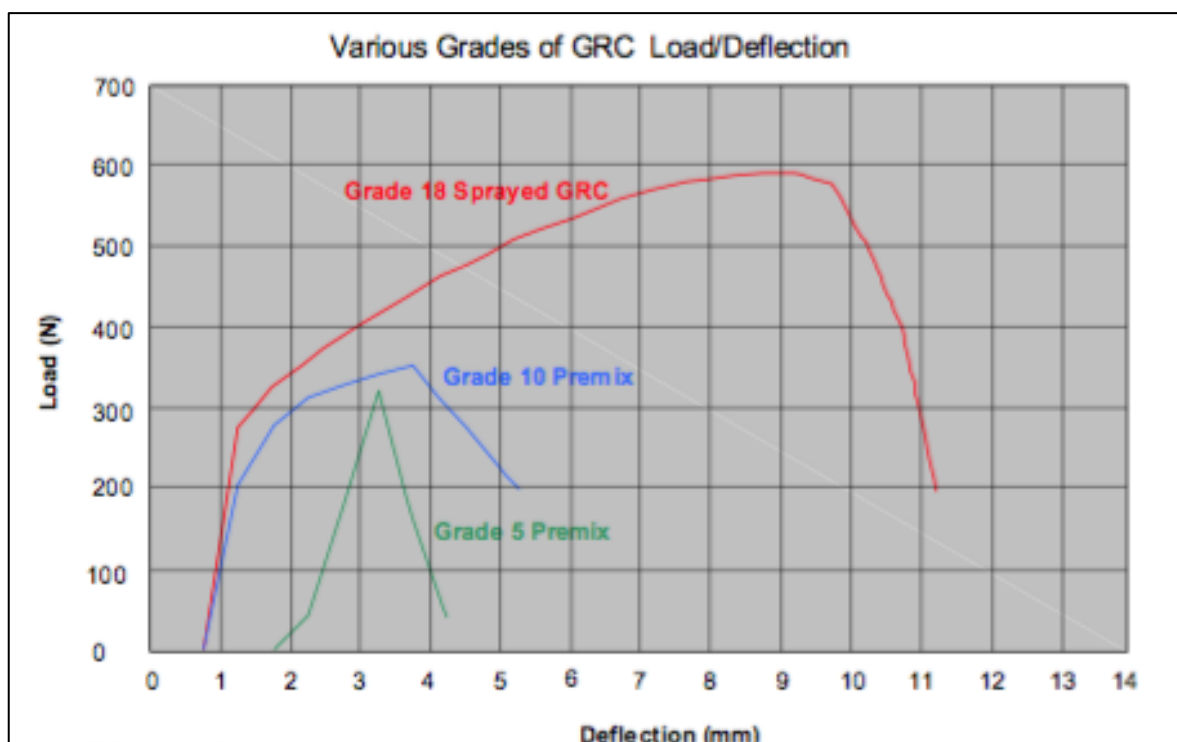


Figura 2.12 – Resistência à flexão e curva carga/deflexão (GRCA, 2015)

A composição mais simples de GRC contém cimento, areia, água, superplastificante, e fibra de vidro alcali-resistente. Variações tais como o uso de adições pozolânicas é comum num certo número de países e emulsões de polímeros acrílicos são amplamente utilizados para permitir a "cura a seco". Os pigmentos podem ser utilizados para conferir diversas cores ao produto GRC (GRCA, 2015).

Em termos de efeito sobre as propriedades de resistência, a quantidade e a forma da fibra de vidro utilizada no GRC é um fator significativo, ligado ao processo pelo qual a fibra é introduzida na matriz cimentícia. Pelo método de spray up, que será explicado adiante, o GRC é mais forte e inclui normalmente 4-5% de fibra de vidro, de comprimento 25 a 40 mm. O GRC fabricado pelo método premix inclui normalmente entre 2% a 3,5% de fibra de vidro em relação ao peso do cimento, de comprimento habitual de 12 milímetros (GRCA, 2015).

2.3.1 Resistência à compressão

Os produtos de GRC formam elementos de espessura muito pequena, em torno de 12 mm, portanto defini-lo com características de resistência à compressão não é apropriado. Até porque raramente o GRC trabalhará a compressão pura (REGÁS, BOLAÑOS, 2007).

Não obstante, esta característica em um GRC elaborado com ajuste às normas internacionais terá os valores expressos na Tabela 1.

Tabela 2.1 - Resistência à compressão (Cem-Fil Ltd., 1999).

Tipo do GRC	Resistência à compressão (MPa)
Spray-up	50 – 80
Premix	40 - 60

2.3.2 Resistência à flexão

A resistência à flexão é provavelmente a propriedade física mais importante do GRC. É a propriedade mais frequentemente testada e é aquela em que se baseiam a maioria dos projetos. Da mesma forma em que o concreto é classificado pela resistência à compressão, por exemplo, C40 / 50, o GRC é caracterizado pela sua resistência à flexão. O GRC grade 18 significaria uma resistência à flexão (módulo de ruptura) característica de 18 MPa aos 28 dias (GRCA, 2015).

O ensaio completo de resistência à flexão deve trazer três informações: o limite de proporcionalidade, o módulo de ruptura e a deformação na ruptura.

O módulo de elasticidade não deve ser confundido com o limite elástico ou da proporcionalidade, note que o primeiro é expresso em GPa e o segundo em MPa. O módulo de elasticidade que é cerca de 15 GPa é importante para antecipar deformações de flecha que uma peça possa apresentar, dependendo de sua espessura e da distancia entre os suportes do painel.

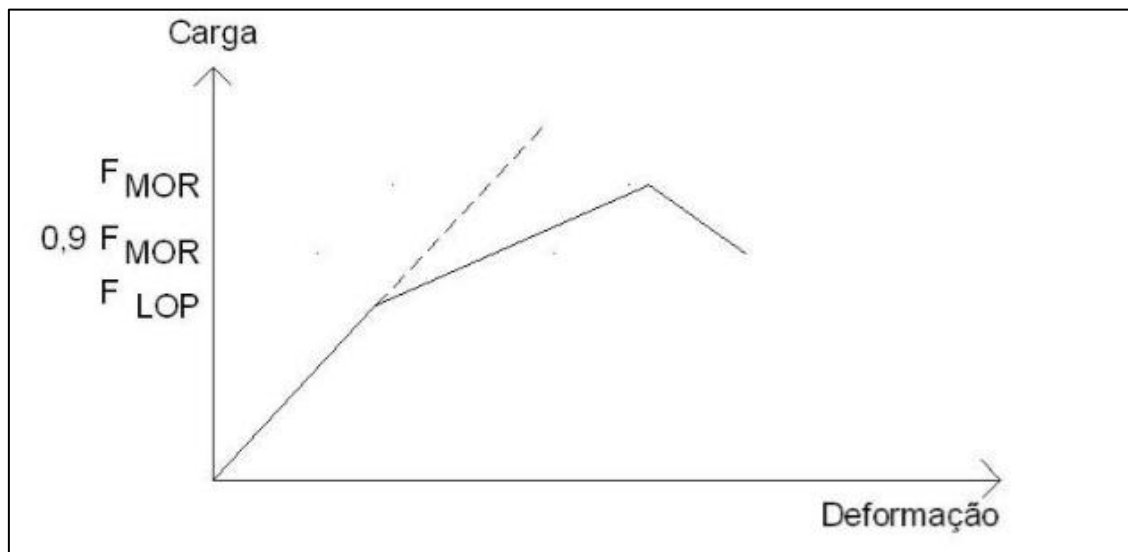


Figura 2.13 - Curva de carga/deformação (ABNT, 2005)

É por isso que é comum expressar as características de resistência à flexão de GRC com três magnitudes obtidas com o teste de flexão completo, a saber: limite de proporcionalidade (LOP), módulo de ruptura (MOR) e alongamento na ruptura. Por exemplo, um GRC comum é definido como 10/18/3, o que significa que tem um limite de proporcionalidade de 10 MPa, um módulo de ruptura de pelo menos 18 MPa e alongamento na ruptura de 3% (REGÁS, BOLAÑOS, 2007).

O limite de elasticidade ou de proporcionalidade (LOP) é a característica que melhor reflete a qualidade do GRC, da mesma maneira que a resistência à compressão é a melhor característica expressa pelo concreto.

Quando um esforço ultrapassar o limite de elasticidade mesmo que interrompido, ele causa uma deformação permanente, que embora aceitáveis do ponto de vista de durabilidade, mas não do ponto de vista arquitetônico. Por exemplo, é bem conhecido que um painel de fachada quando sofre uma flecha, mesmo que seja de poucos milímetros, causa um aspecto visual muito desagradável. (REGÁS, BOLAÑOS, 2007).

A resistência à flexão depende de muitos fatores, percentual de fibra de vidro, composição dos elementos da mistura, método de fabricação e cura após fabricação. Os valores não podem ser assumidos e testes de flexão devem fazer parte do controle de qualidade para todos os fabricantes (GRCA, 2015).

Tabela 2.2 - Resistência à flexão do GRC aos 28 dias (GRCA, 2015).

Tipo do GRC	LOP (MPa)	MOR (MPa)
Spray-up	05 – 10	18 – 30
Premix	05 – 10	05 – 14

2.3.3 Resistência à tração

Ensaio de tração não é normalmente realizado como parte do controle de qualidade de rotina por dois motivos, historicamente tem-se revelado difícil de alcançar resultados de reprodutibilidade de testes de tração em amostras de GRC e porque a resistência à flexão ganhou mais importância nos projetos (GRCA, 2015).

É medido em dois parâmetros, BOP e UTS. O BOP é a curvatura sobre o ponto de tração, ou seja, a tensão na qual a curva de tensão / deformação se desvia de uma linha reta quando a variação de uma amostra de GRC é testado em tensão direta. O UTS é o estado de colapso, este estado limite é verificado através

de um número de fatores parciais de segurança aplicadas tanto para a dosagem de GRC e a carga aplicada (GRCA, 2015).

Não existe um método de ensaio normalizado especificamente para o GRC, embora existam trabalhos de pesquisa sobre o assunto.

Tabela 2.3 - Resistência à tração (GRCA, 2015).

Tipo do GRC	BOP (MPa)	UTS (MPa)
Spray-up	04 – 06	08 – 12
Premix	03 – 05	03 – 06

2.3.4 Resistência à cisalhamento

Historicamente testes para resistência ao cisalhamento não é parte de testes de rotina, embora para alguns produtos, pode ser um fator significativo no projeto. Como a resistência interlaminar na região de fixação do painel à estrutura.

Não existe nenhum método específico para determinar a resistência ao cisalhamento de GRC.

Tabela 2.4 - Resistência ao cisalhamento (GRCA, 2015).

Tipo do GRC	Interlaminar (MPa)	In-plane (MPa)
Spray-up	02 – 04	07 – 12
Premix	04 – 06	04 – 06

2.3.5 Retração

Todos os materiais de base cimentícia são susceptíveis a deformações à medida que são molhados e secos. Após a fabricação do GRC e sua cura, a peça fabricada seca e sofre uma retração inicial, quando este material for umedecido posteriormente não voltará ao tamanho original, ou seja, parte dessa retração inicial é irreversível e impede que o painel volte ao tamanho original (Cem-Fil Ltd., 1999; GRCA, 2015). O comportamento de encolhimento e movimento devido a variação de umidade estão representados no diagrama, exposto na figura 2.14.

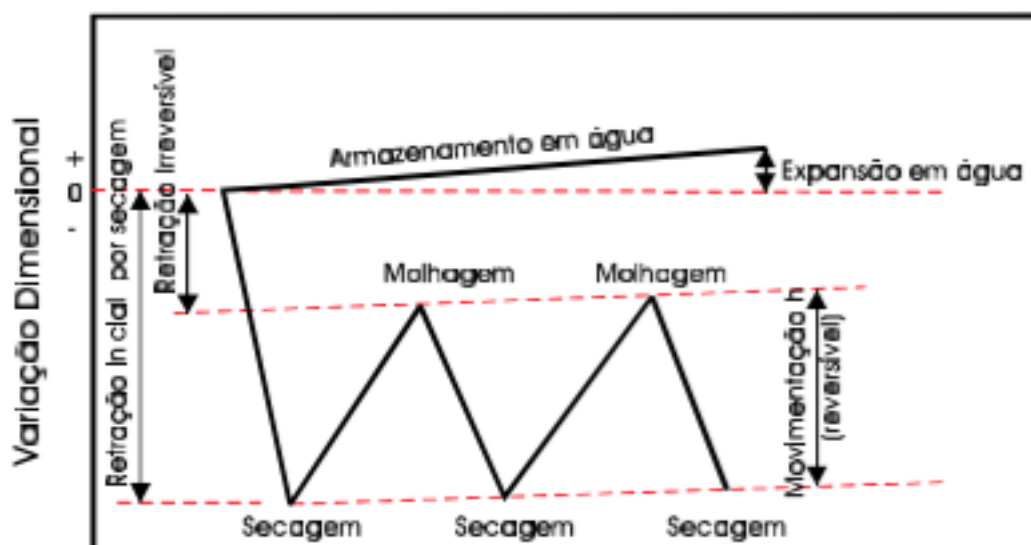


Figura 2.14 - Comportamento do GRC em relação a variações de umidade do meio externo (SILVA, 1998)

Deve notar-se que a amplitude de movimento reversível citado acima é entre condições completamente secas e totalmente úmidas, como no laboratório. Na prática, estes extremos não podem ser experimentados em condições normais de clima apesar de haver algum movimento cíclico sobre um nível médio que é efetivamente diminuído em relação às dimensões fabricadas inicialmente (GRCA, 2015).

Como a composição do GRC é muito rica em cimento, a retração tende a ser alta. Uma das maneiras de amenizar este efeito é aumentar a adição de areia. Para as formulações mais correntes de GRC para painéis (relação cimento:areia alternando entre 1:1 e 1:0,5), a deformação causada por retração irreversível é de aproximadamente 0,05% (0,5 mm/m) e chega a 0,15% (1,5 mm/m) para a retração reversível (Figura 2.15) (MOORE, 1984; apud SILVA, 1998).

O encolhimento final de materiais cimentícios é mais elevada quando a matriz é à base de cimento puro. O encolhimento é reduzido por diluição do cimento com agregados não sensíveis ao movimento pela umidade: esta é uma prática padrão para argamassas e concretos. Antigamente o GRC empregava cimento puro como uma matriz, mas agora é normal adicionar uma proporção de agregado fino de boa qualidade (normalmente areia de sílica), a fim de reduzir o encolhimento. Mostra o efeito de adições de areia de sílica sobre o comportamento de encolhimento GRC, um efeito muito semelhante ao do aumento do teor total de argamassa ou concreto. Cem-Fil Ltd. (1999)

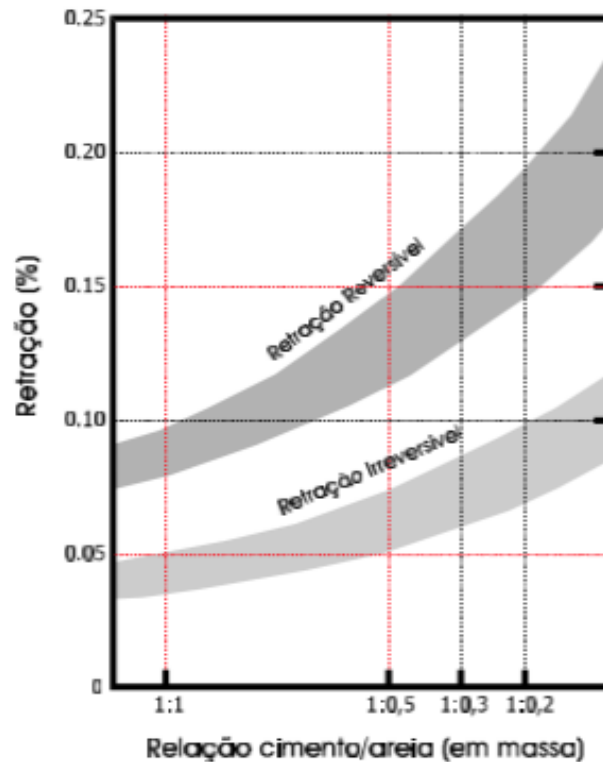


Figura 2.15 - Influência do teor de areia na retração (SILVA, 1998)

Adicionar polímero acrílico na mistura tem um efeito benéfico na moderação da retração reversível assim como a adição de outros produtos que possam modificar a matriz cimentícia, como o metacaulim (Cem-Fil Ltd., 1999).

A complexidade do mecanismo de encolhimento em materiais com matriz cimentícia se deve aos inúmeros fatores que afetam tanto a retração reversível como a irreversível. A retração total é afetada principalmente pela proporção de agregados e suas origens, água e o cimento. O efeito de diferentes tipos de cura não é determinante para a retração do concreto, mas para o GRC se torna evidente após experimentos sugerirem que o GRC que não tenha recebido uma cura úmida suficiente sofre aumento inicial da retração irreversível de até 0,10%, e a retração total é aumentado em até 0,25% (Cem-Fil Ltd., 1999).

Como o GRC é um material relativamente impermeável, mudança na umidade ambiente pode demorar a afetar a umidade interna do painel de GRC. 10 mm de espessura de um GRC fabricado pelo método spray-up levará cerca de 20 dias para se equilibrar com a umidade ambiente. O GRC utilizado em painéis sanduíche, em particular aqueles com núcleos de material leve, irá reagir muito mais lentamente, no sentido de secagem após sua fabricação, quando é provável que o equilíbrio não será alcançado por vários meses em condições de clima temperado. Isso claramente tem implicações para a concepção e instalação de componentes, em que o movimento de retração terá de ser permitido livremente, a fim de evitar tensões indesejáveis no GRC (Cem-Fil Ltd., 1999).

O painel em sua vida útil será submetido a várias fontes de deformação, e a retração será a primeira causa em que o painel será sujeito, acontecendo antes mesmo da exposição da componente a variações de temperatura. (SILVA, 1998).

2.3.6 Resistência ao impacto

Outra característica do GRC é sua elevada resistência ao choque, tanto de impacto de corpo duro como de corpo mole. É certo que a espessura do GRC é muito pequena, mas também é considerado um concreto, portanto sua característica de resistência ao impacto guarda semelhanças às características do concreto, salvo que o GRC está reforçado com fibra de vidro, aumentando seu limite elástico e sua deformação em comparação a um concreto convencional (REGÁS; BOLAÑOS, 2007).

A presença de fibras no GRC limita a propagação de fissuras na peça, e o dano se limita apenas ao local do impacto, o que auxilia a reparação de danos sem prejuízo para os produtos (Cem-Fil Ltd., 1999; GRCA, 2015).

A resistência ao impacto do GRC é normalmente medida usando uma máquina de teste de Izod ou Charpy modificada, em amostras de 25 a 50 mm de largura e 6 a 12 mm de espessura. Os valores obtidos nestes testes são de pouca utilidade, exceto para a finalidade de comparação com amostras de GRC e outros materiais submetidos ao mesmo teste. Tais comparações mostram a resistência ao impacto do GRC para ser maior do que a de muitos materiais semelhantes (GRCA, 2015).

Tabela 2.5 - Resistência ao impacto aos 28 dias (GRCA, 2015).

Tipo do GRC	Resistência ao impacto de Charpy (N/mm/mm ²)
Spray-up	15 – 25
Premix	07 - 12

2.3.7 Resistência ao fogo

GRC é um material à prova de fogo. A maioria dos projetos de dosagem de GRC não contém nenhum material orgânico em sua composição a não ser a pequena quantidade de superplastificantes. Essa formulação é congruente com o critério de não combustibilidade da União Europeia. O GRC que contém polímero acrílico em sua composição também se mantém funcional em relação ao fogo apesar de não ser classificado como não combustível (GRCA, 2015).

Quando testado para inflamabilidade, propagação do fogo e propagação superficial de chama atinge a maior avaliação possível e está em conformidade com as prescrições da classe definidos pelo regulamento de construção britânico. Em todos os casos, a emissão de fumo é muito baixa e a emissão de fumos tóxicos é mínima (GRCA, 2015).

Quando o GRC é usado painéis pré-fabricados a resistência ao fogo depende da totalidade da construção. Camadas simples de GRC não têm garantia de integridade dos testes de resistência ao fogo habituais a menos que a dosagem do GRC tenha sido modificada para permitir que o GRC possa libertar vapor de umidade facilmente durante a parte inicial do procedimento de teste (GRCA, 2015).

2.3.8 Resistência à abrasão

A resistência à abrasão ou erosão de derivados de cimento pode ser avaliada através de vários métodos de ensaio. É necessário ter cuidado no sentido de tornar as comparações de desempenho dos materiais, uma vez que é evidente que um material pode ter um melhor desempenho, em um sentido de classificação, de acordo com um teste do que para outro. O GRC foi testado de acordo com uma forma modificada da norma ASTM C418-68 que envolve a dirigir um jato de areia movido a ar na amostra. Sob este teste das amostras de GRC teve um bom desempenho em comparação com concreto e fibrocimento. Os resultados deste trabalho, expressa como volume de perda, são apresentados na Tabela 6 (Cem-Fil Ltd., 1999).

Tabela 2.6 - Redução de volume pelo processo de abrasão em jato de areia (Adaptado de Cem-Fil Ltd., 1999).

Material	Perda de volume seco (cm ³)
GRC (Spray-up)	0,30
Cimento puro	0,14
Pavimento de concreto	0,32
Granito	0,88

2.3.9 Densidade, absorção de água e permeabilidade

A densidade regular de um GRC está normalmente em torno de 2000 kg/m³ que é um valor um pouco abaixo da densidade do concreto convencional. Isso nos mostra que os baixos pesos dos painéis do GRC são proporcionados pela sua pequena espessura, e não pela sua densidade (Cem-Fil Ltd., 1999).

O significado da densidade, entretanto, vai além do conceito da massa. Densidade é um bom parâmetro da qualidade do material, um GRC denso indica que o material foi bem compactado, que a relação a/c foi bem estudada. (Cem-Fil Ltd., 1999).

Tabela 2.7 - Densidade aparente seca do GRC (Cem-Fil Ltd., 1999)

Tipo do GRC	Densidade aparente seca (kg/m ³)
Spray-up	1900 – 2100
Premix	1900 – 2000

A absorção de água e porosidade aparente são mais altos do que aqueles para o concreto convencional, que normalmente exibem uma absorção de água inferior a 10%. Este é um resultado direto do alto teor de cimento do GRC. A permeabilidade do GRC é, contudo, significativamente mais baixa do que a do concreto (GRCA, 2015).

2.3.10 Condutividade térmica

A condutividade térmica depende da densidade do material e os componentes da mistura. O GRC comum tem uma densidade típica de 1900 a 2100 kg/m³ e uma condutividade térmica na gama de 0,5 a 1,0 W/M °C, o que significa que o GRC não é um bom isolante térmico. Entretanto, em painéis de GRC sandúiche ou até mesmo skin pode ser empregado algum tipo de isolante térmico (GRCA, 2015; Cem-Fil Ltd., 1999).

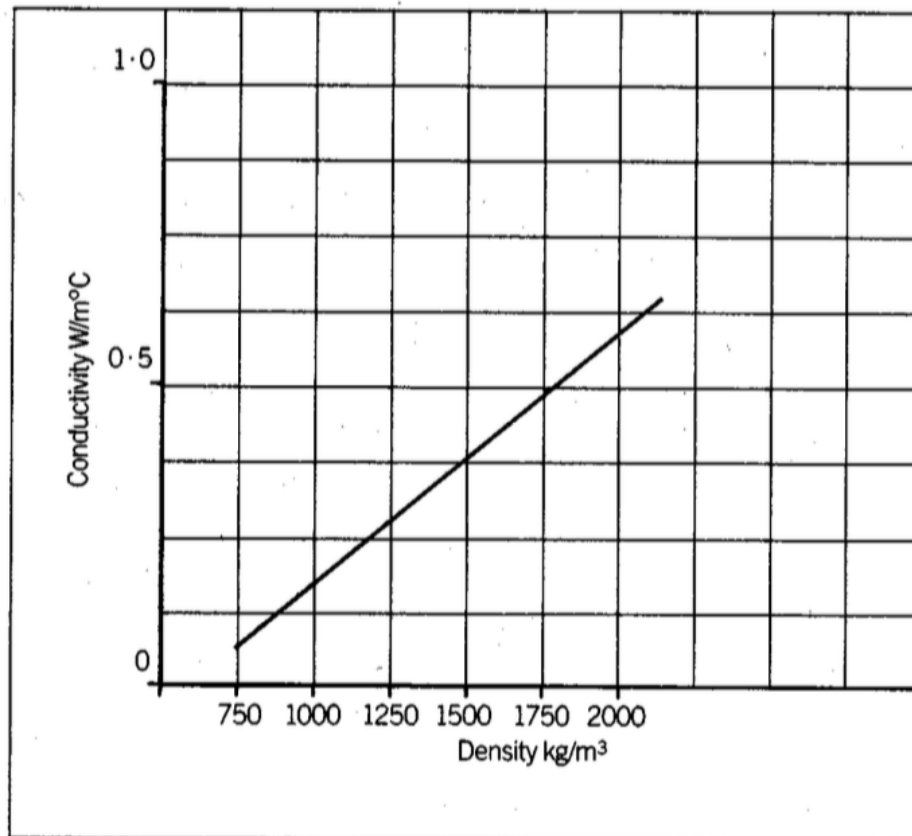


Figura 2.16 - Condutividade térmica do GRC (Cem-Fil Ltd., 1999)

2.3.11 Isolamento acústico

O isolamento de som de um material homogêneo depende de três propriedades físicas.

- massa superficial (peso por unidade de área).
- Rigidez (dependente forma de painel).
- amortecimento

Destes, a massa superficial é a mais importante na determinação do isolamento acústico nas frequências mais baixas.

Há uma curva geral relativa a massa superficial de material contra a redução de som, que é razoavelmente verdadeira para a maioria dos materiais homogêneos. Esta curva “Lei da Massa” é mostrada no gráfico a seguir. Os números de redução de som apresentados são baseados em uma média de frequências de 100 Hz a 3150 Hz. Para cada duplicação da superfície de massa há um aumento de aproximadamente 5 dB na redução de som. Assim, uma típica espessura de 10 mm de GRC que tem uma massa superficial de 20 kg/m², terão uma redução de som médio de cerca de 30 dB. O aumento da espessura a 20 mm vai aumentar a redução de cerca de 35 dB. Novos aumentos na redução de som exigirão um número muito

maior de massa de superfície global e isso pode ser antieconômico usando GRC do tipo skin (Cem-Fil Ltd., 1999).

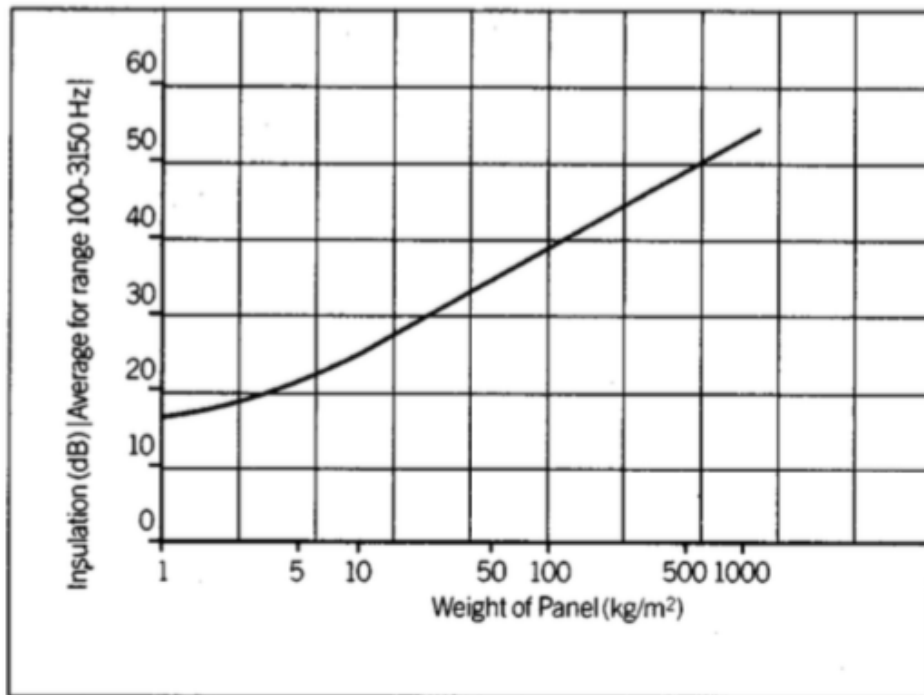


Figura 2.17 - Curva da redução do som / peso painel de GRC (Cem-Fil Ltd., 1999)

Para cada projeto é necessário fazer um estudo específico, pois junto ao GRC podem ser empregados isolantes acústicos, como no caso dos painéis sanduíche, no qual é inserido um isolante acústico, atingindo melhores resultados.

2.4 PROCESSO PRODUTIVO DO GRC

Existem diversos processos produtivos do GRC, porém apenas dois são amplamente difundidos para os diversos tipos de produção dos produtos de GRC: spray-up e premix.

2.4.1 Spray-up

Na fabricação de GRC pelo método spray up, ocorre a pulverização simultânea da argamassa (cimento, areia e água) com a fibra de vidro álcali resistente, essa pulverização ocorre através de uma pistola. Neste método, a fibra de vidro é usada em rolo (roving) e cortada dentro da cabeça do pulverizador, como podemos ver na figura 2.18, sendo pulverizada simultaneamente com a argamassa.



Figura 2.18 - Fibra álcali resistente em rolo (esquerda) e pistola spray up (direita) (Acervo próprio)

Conforme OCV Reinforcements (2008), a argamassa, composta por cimento, areia, água e possíveis aditivos, é preparada separadamente, e mesclada por um misturador de eixo horizontal capaz de produzir uma argamassa livre de grumos. A ordem de mistura dos componentes é importante, ilustrada na figura 2.19.

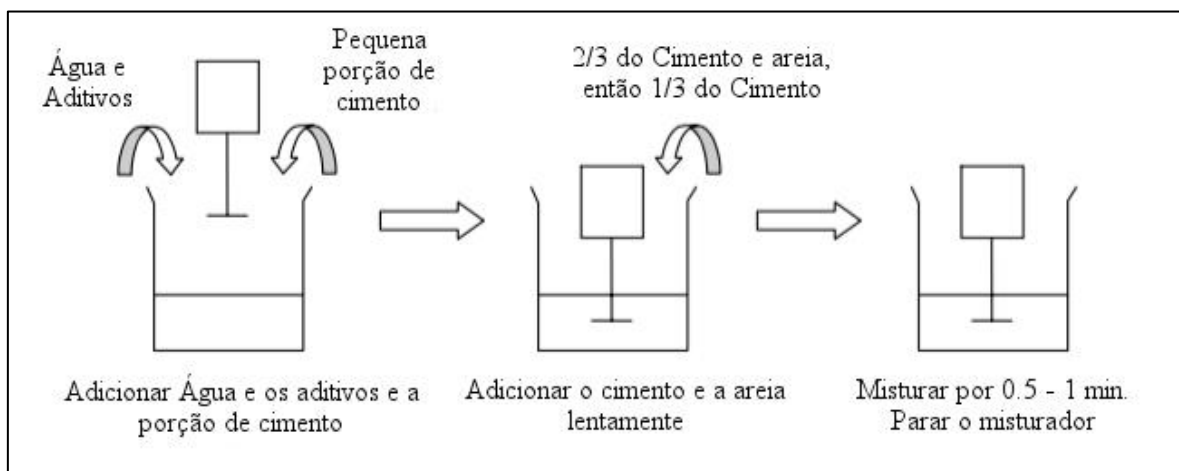


Figura 2.19 - Sequencia de mistura para o método spray up (adaptado de OCV REINFORCEMENTS, 2008)

A pasta de argamassa é alimentada para a pistola de pulverização a partir de uma unidade de bomba de medição e é dividida em gotas por ar comprimido. A fibra de vidro utilizada em rolo é alimentada para o interior da pistola, onde existe um triturador de fibra de vidro, que corta a fibra para comprimentos pré-

determinados, normalmente entre 25 e 40 mm e injeta os fios cortados na pulverização de argamassa de modo a que um feltro de fibras e argamassa é depositada no molde (Cem-Fil Ltd., 1999).

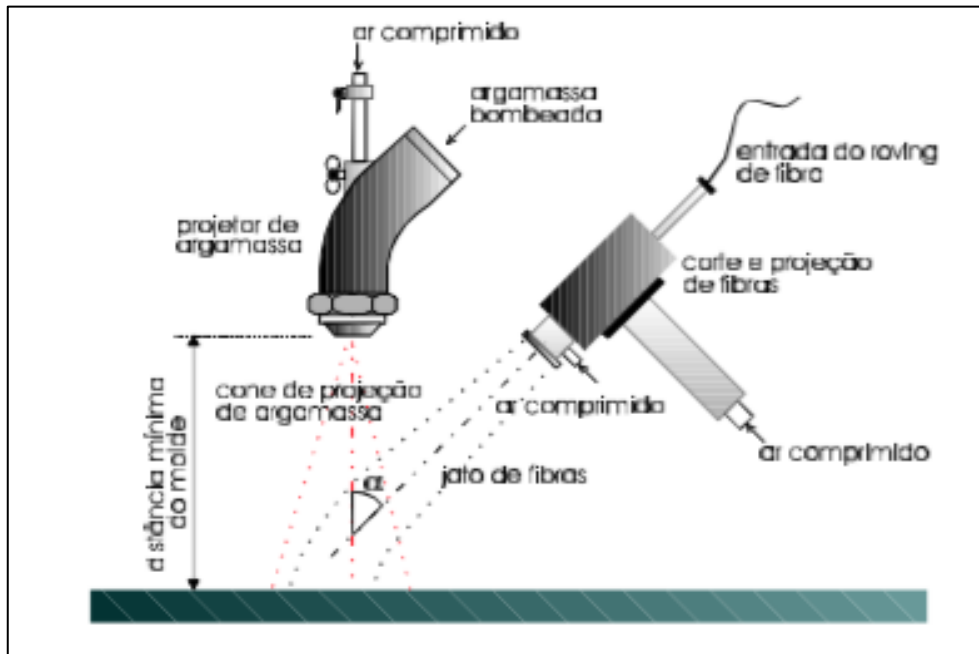


Figura 2.20 - Esquema do bico utilizado na aspersão direta (spray up) (BENTUR;MINDESS, 1990 apud SILVA, 1998)

A dosagem da argamassa geralmente tem uma relação água e cimento de 0,33 e uma relação de areia e cimento de 1:1. A proporção de água e cimento ser mantida sempre baixa, caso haja algum problema de fluidez na pulverização deve ser empregado aditivo superplastificante ao invés do aumento da quantidade de água na mistura, para a manutenção da resistência do GRC.

2.4.2 Premix

Todos os processos de pré-mistura envolvem a mistura em conjunto do cimento, areia, água, aditivos e fios cortados de fibras de vidro em um misturador antes de ser moldado.

Para produzir um GRC em pré-mistura de qualidade é necessário fazer a mistura em duas fases. A primeira fase é concebida para produzir uma pasta de alta qualidade para alcançar a trabalhabilidade necessária para permitir a incorporação uniforme das fibras de vidro. A segunda etapa é a mistura das fibras de vidro na argamassa a uma velocidade reduzida, a fim de evitar danos as fibras. É mais conveniente efetuar ambas as fases no mesmo equipamento, mas misturadores separados podem ser utilizados para cada fase.

A formulação da mistura real usada depende do tipo de produto a ser feito, mas uma mistura típica tem uma relação areia e cimento de 1:1 e uma proporção água e cimento de preferência inferior a 0,35. É

essencial manter a relação água e cimento baixa para a manutenção da resistência do GRC. Caso seja necessário melhorar a trabalhabilidade da mistura deverá ser adicionado aditivo superplastificante.

Neste método, o que mais diferencia sua dosagem em relação ao método de aspersão é a quantidade de fibras de vidro. Para não perder trabalhabilidade é empregado até 4% de fibras de vidro cortadas em relação ao peso. O comprimento desta fibra usualmente é de 12 mm, porque fibras maiores dificultam a trabalhabilidade.

O GRC fabricado pelo método de pré-mistura pode ser despejado no molde/forma através de um pulverizador, ou de um tubo peristáltico, alimentado por uma bomba.

2.5 A CURA DO GRC

A cura tem dois objetivos, evitar a perda de umidade e controlar a temperatura por um período suficiente para atingir o nível de resistência desejado (MEHTA, MONTEIRO, 2008).

Como a hidratação do cimento é um processo lento à temperatura ambiente, em locais muito quentes o material pode perder umidade para o ambiente, prejudicando a hidratação dos cristais cimentícios.

Os produtos de GRC são normalmente esbeltos, ou seja, com pequenas espessuras, e fabricados com uma relação água e cimento baixa, comparados a maioria dos concretos convencionais. Por estes motivos, as peças de GRC são propensas a secagem rápida. Se isto ocorrer antes de hidratação completa do cimento, a peça poderá não atingir a resistência desejada e as propriedades do GRC serão afetadas.

Portanto, após a sua fabricação o GRC deve ser submetido a algum tipo de cura, podendo ser cura úmida ou cura seca.

2.5.1 Cura úmida

Para assegurar a hidratação completa, é essencial que os produtos sejam mantidos úmidos imediatamente após a sua fabricação. Existem diversos métodos para tal objetivo, tais como: armazenamento da peça em quarto úmido, selar a peça em sacos de polietileno ou imersão em água (Cem-Fil Ltd., 1999).

Para todos os produtos o período de cura pode ser dividido em três partes:

- A cura logo após a fabricação da peça, selando o produto com sacos de polietileno a fim de diminuir o fluxo de ar na superfície e diminuir a vaporização.
- A cura após a desmoldagem, como descrito em cima.

- Pós-cura, quando o produto é normalizado para as condições ambientes antes do armazenamento ou utilização.

A taxa de hidratação será diferente em cada etapa de cura, porém todas são essenciais para no fim obter um produto com as características especificadas no projeto. O regime de cura escolhido dependerá do processo de fabricação e do tipo da peça.

Deve-se atentar ao manuseio do componente depois da desmoldagem, pois a peça ainda não atingiu resistências elevadas, podendo ser deformada excessivamente.

2.5.2 Cura seca

Um método alternativo de fazer a cura do GRC é o de incorporar materiais poliméricos em sua composição. A formulação de polímero utilizado deve ser capaz de formar uma película ao redor das partículas de mistura, permitindo assim que a umidade no GRC seja constante, possibilitando a sua hidratação. Os materiais poliméricos são normalmente adicionados a taxas de dosagem de entre 2% e 10% sobre o peso do cimento.

Após a desmoldagem do produto GRC, a cura pode acontecer em condições de ar ambiente, mas deve-se assegurar que a temperatura do ar esteja acima da temperatura mínima para formação da película do polímero.

As propriedades do GRC curados desta forma são semelhantes aos da mesma formulação de base, ou seja, a adição do polímero não prejudica a resistência do GRC, afetando apenas as suas propriedades de desempenho ao fogo.

3 PAINÉIS PRÉ-FABRICADOS DE FACHADA EM GRC

Comercialmente, o GRC é usado para fazer grandes painéis leves, que são muitas vezes utilizados como fachadas. Estes painéis não são considerados como elementos estruturais, são projetados para suportar apenas o seu peso próprio e cargas de vento.

Os painéis são considerados leves devido à finura do material, o que acarreta em um peso menor comparado ao concreto convencional. Painéis pré-fabricados em GRC de fachada estão normalmente ligados a uma estrutura de aço estrutural que suporta o painel e fornece pontos de conexão para fixar o elemento à estrutura da construção.

Painel de GRC tem a cor, textura e forma conforme desejado no projeto, mostrando a versatilidade do material que pode reproduzir fielmente quase qualquer projeto de fachada exterior não vidrada. Além disso, são até 15% mais leve do que os painéis pré-fabricados de concreto convencional, e muitas vezes podem ser instaladas diretamente sobre fachadas existentes, sem impor cargas sobrepostas excessivas na estrutura do edifício.

3.1 TIPOS DE PAINEL E SUAS LIGAÇÕES

3.1.1 Painel skin

Painel formado somente por uma camada de GRC, usualmente realizado com uma placa de 8 a 12 mm, conseguindo peças entre 0,7 e 1,1 m², cujo peso estará entre 16 e 24 kg/m² (REGÁS; BOLAÑOS, 2007).

Sistema muito limitado, porque existe dificuldade na ligação à estrutura, por conta da pequena espessura. A sua ligação se dá por perfis metálicos inseridos no GRC que possam ser parafusados na estrutura posteriormente.

3.1.2 Painel skin nervurado

Painel formado por uma camada de GRC, como o painel skin, porém com nervuras em sua composição. O objetivo desta técnica é aumentar a inércia do painel através da volumetria. É uma técnica muito interessante, pois em comparação com o painel skin é possível aumentar as dimensões do painel sem fazer alterar a resistência do GRC.

Pode fabricar peças de até 6 m² com um peso de até 36 kg/m², o que é 6 vezes maior do que o painel skin convencional (REGÁS; BOLAÑOS, 2007).

Com o possível aumento de dimensão, o painel skin nervurado passou a ser utilizado em maior escala na construção, pois permitiu o aumento da produtividade na montagem nos canteiros de obras. Foi o primeiro sistema de painel da Europa com evolução das placas laminares simplesmente parafusadas na estrutura.

É recomendável que esta solução seja produzida associada a um tratamento superficial das faces do painel com pintura de silicatos, já que a retenção de umidade é maior nas nervuras do que no restante do painel, podendo gerar um efeito estético desagradável (REGÁS; BOLAÑOS, 2007).

Os materiais empregados nas nervuras são o isopor, poliuretano, perfis de fibra de vidro com resina poliéster, perfis de PVC e perfis de aço galvanizado.

As nervuras podem ser no perímetro do painel, como na figura 3.1, ou centrais, se o projeto exigir.

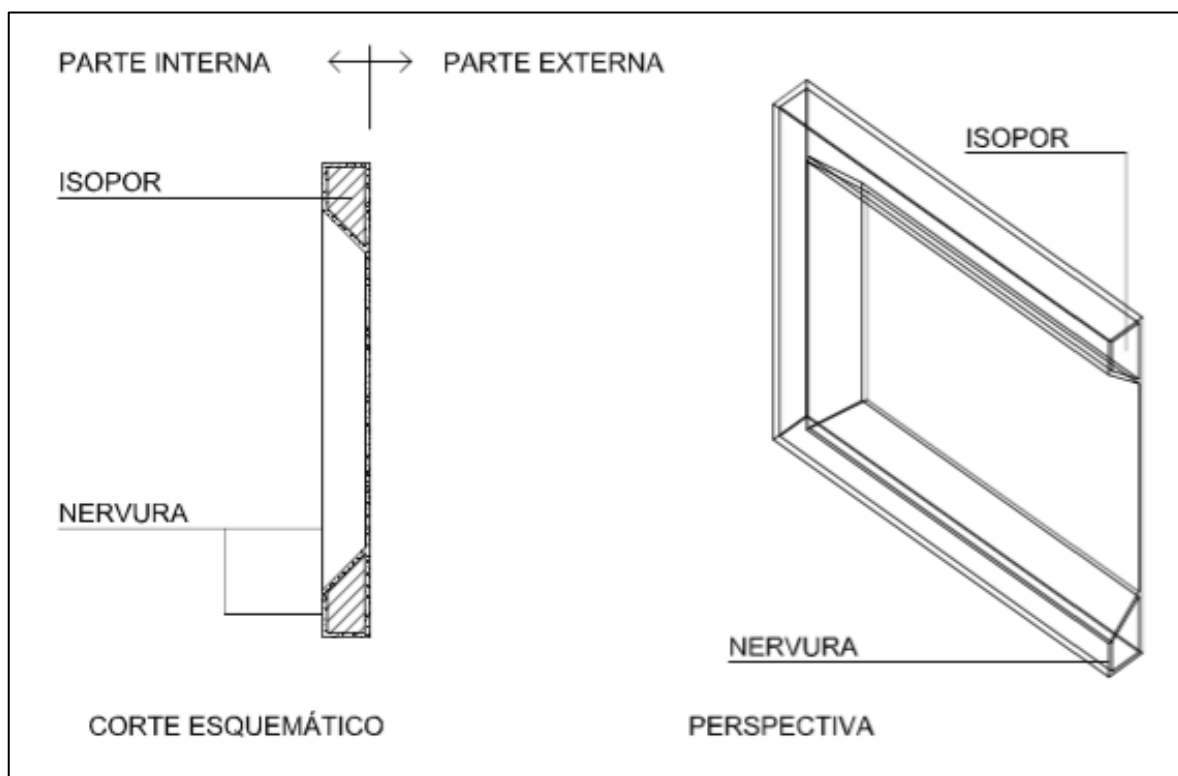


Figura 3.1 – Esquema do painel skin nervurado (Cem-Fil Ltd., 1999)

A sua ligação com a estrutura se faz por meio de perfis inseridos no painel e posteriormente parafusados na estrutura, ou seja, um método simples e fácil.

3.1.3 Painel skin com stud frame

Painel formado somente por uma camada de GRC, usualmente a face externa, conectado através de ancoragens a uma estrutura metálica de aço galvanizado ou tratado.

A tecnologia do GRC deu um salto quando surgiu nos Estados Unidos a pré-fabricação deste sistema híbrido, com placas de GRC e estrutura de aço conectados por ligações flexíveis, denominado painel skin + stud frame (REGÁS;BOLAÑOS, 2007).

A utilização de painéis de fachada em GRC com stud frame em conjunto com superestruturas de aço, é a união perfeita, já que a linguagem construtiva e a de cálculos basicamente são as mesmas utilizando-se de perfis semelhantes para todo o sistema (FACCIO, 2004).

A estrutura metálica no verso do painel de GRC dá grande versatilidade para a ligação com a estrutura, seja de concreto armado ou de aço. Além disso, todos os esforços produzidos pelo movimento da estrutura são absorvidos pela estrutura de aço, resguardando o painel de GRC.

A estrutura de aço que suporta o painel GRC é composta pelos bastidores tubulares e o conector soldado no bastidor tubular como pode ser visto na figura a seguir.

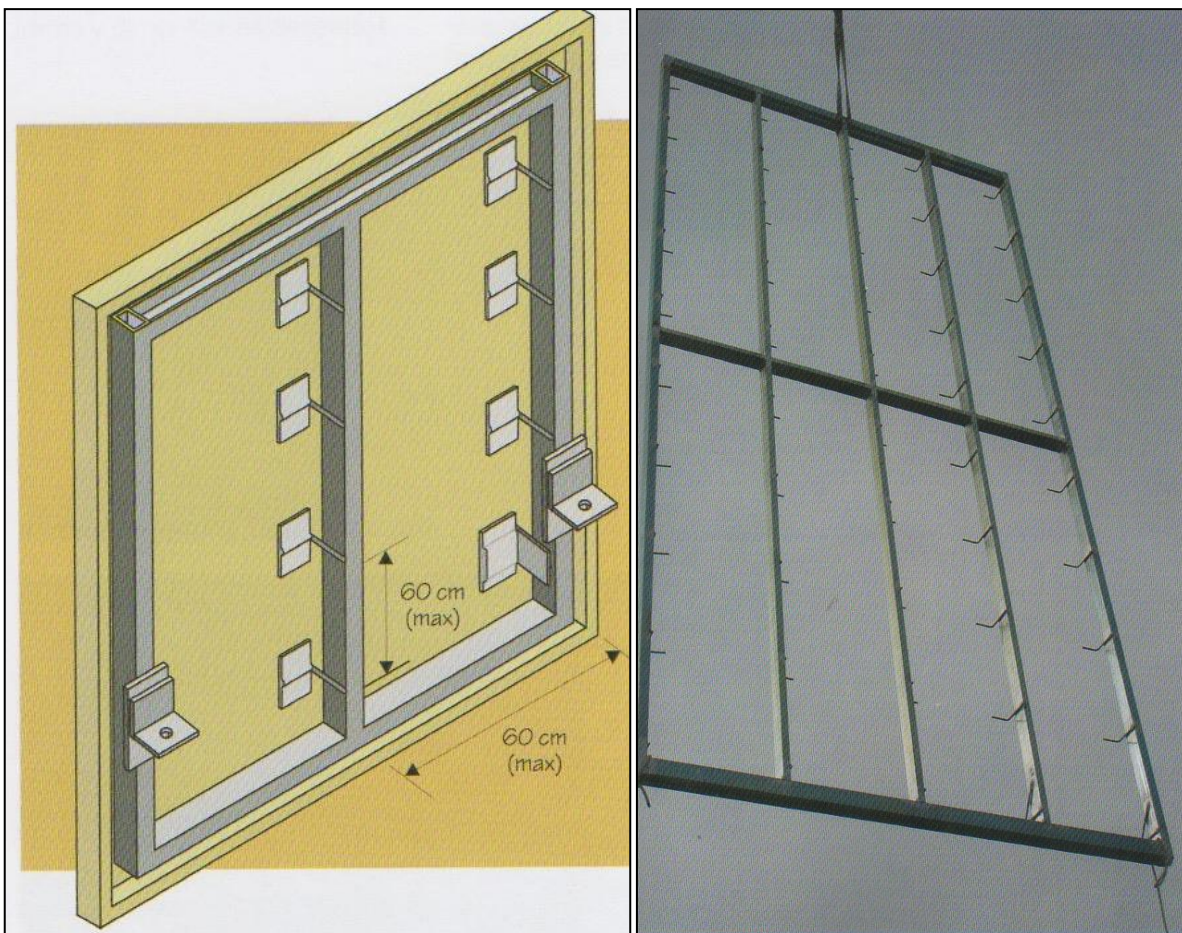


Figura 3.2 – Esquema do bastidor tubular e os conectores (REGÁS; BOLAÑOS, 2007)

Ao longo de todo painel, devem existir os conectores que faz a ligação entre o bastidor tubular e o painel de GRC, intercalados em no máximo 60 centímetros. Na extremidade do bastidor, existe um conector diferente, chamado de anti-gravidade, como pode ser visto na figura a seguir.



Figura 3.3 – Esquema dos conectores intercalados em no máximo 60 centímetros (esquerda) e esquema do conector anti-gravidade (direita) (REGÁS; BOLAÑOS, 2007)

O fechamento interno é dado através de placas de gesso cartonado ou de GRC, parafusadas diretamente nos perfis metálicos do stud frame, logo após as instalações prediais hidráulicas e elétricas serem montadas, bem como o isolamento térmico e acústico instalado.

3.1.4 PAINEL SANDUÍCHE

Painel formado por duas faces laminares de GRC e unidas pelo perímetro de suas extremidades, ou por nervuras de GRC no meio do painel, dependendo de sua dimensão. Uma das faces é direcionada para o lado externo da edificação e a outra para o lado interno do edifício. Seu interior é preenchido por isolantes térmicos e acústicos, como por exemplo: poliestireno expandido, lã de rocha ou de vidro.

Na figura a seguir, podemos ver a inclusão do isolante térmico no interior do GRC com placas de poliestireno expandido e depois o painel pronto.



Figura 3.4 – Inclusão do isolante térmico no painel sanduíche (esquerda) e o painel pronto (direita)
(Acervo próprio)

Este tipo de painel de GRC é denominado de origem europeia, por ser largamente utilizado na Europa como sistema construtivo de paredes em casas modulares, ou edifícios de pequena altura.

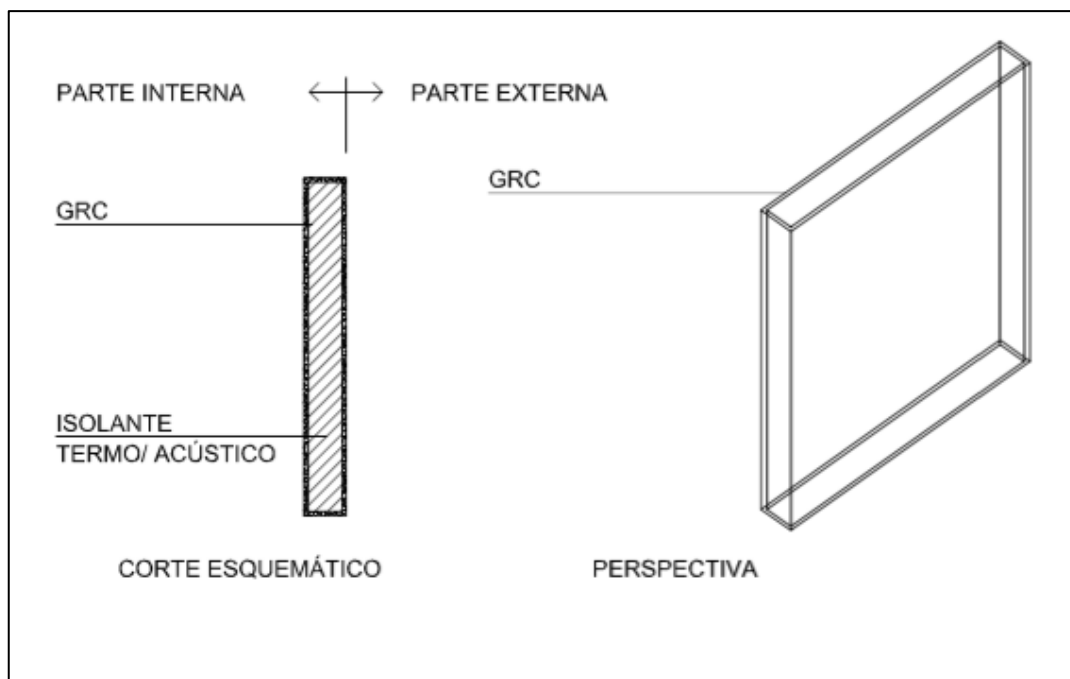


Figura 3.5 – Esquema do painel sanduíche (Cem-Fil Ltd., 1999)

3.2 MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO

Atualmente não existe nenhuma normativa publicada por órgão regulamentador, em nenhum país. Entretanto, existem manuais e procedimentos de cálculo pelas associações de GRC de alguns países, como a GRCA (Glass Reinforced Cement Association) do Reino Unido ou do PCI (Precast Concrete Institute) dos Estados Unidos da América. Neste trabalho será analisada a abordagem de cálculo utilizado pela GRCA.

3.2.1 Princípios de projeto

GRC é usado principalmente para a fabricação de produtos arquitetônicos e industriais de fachada, que não necessitam cumprir funções estruturais. Estes produtos devem ser cuidadosamente projetados para garantir que eles não se tornem impróprios para a utilização durante a sua vida útil. Os possíveis efeitos adversos de desmoldagem, manuseio, transporte e fixação deve ser considerado. Tensões induzidas pela ação do vento, retração e movimentos térmicos, cargas mortas e cargas impostas devem ser calculados e combinados para produzir as condições mais desfavoráveis para fins de projeto (GRCA, 2015).

O projeto também deve considerar variações prováveis na espessura do GRC, as diferenças do comportamento à flexão de corpos de prova e da seção transversal, bem como o modo de colapso e as consequências de falha. Deve ser adotada uma abordagem do estado limite de modo a que cada um destes efeitos possa estar associado a um fator de segurança parcial. Claramente, o projetista deve

exercer julgamento razoável para a determinação dos valores dos coeficientes parciais para ser utilizado no projeto. Esta abordagem também permite a análise de sensibilidade a ser levada à risca utilizando diferentes valores dos coeficientes parciais, dando assim maior controle sobre a concepção do que até agora utilizada no método de “tensão admissível”. O método do estado limite utiliza técnicas estatísticas para determinar as cargas de projeto a partir dos valores característicos correspondentes para explicar variações prováveis nestes parâmetros de projeto durante a vida de projeto do produto GRC (GRCA, 2015).

Variações nas cargas e na resistência do material podem ser moldadas pela distribuição dada pela função de Gauss, vulgarmente conhecida como distribuição normal. Esta distribuição é mostrada na figura a seguir, onde a densidade de frequência é traçada contra o valor de observação.

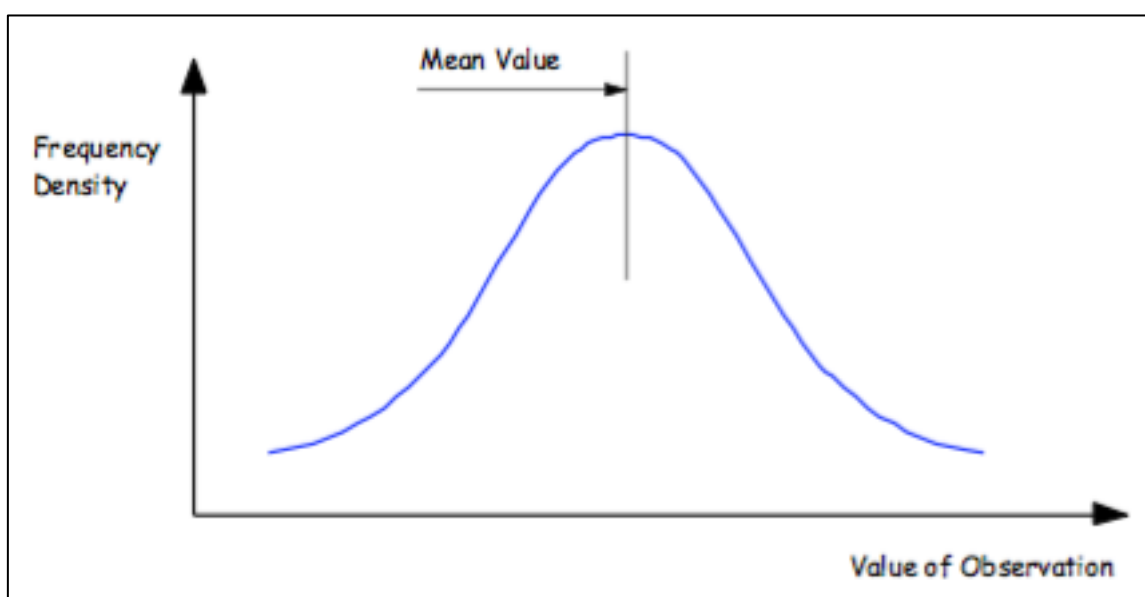


Figura 3.6 – Curva de Gauss (GRCA, 2015)

O desvio padrão estimado (σ), isto é, o desvio quadrático médio, com base na média da amostra (x') de recolha de amostras n ou observações é dado pela eq. (5).

$$\sigma = [\sum(x_i - x')^2 / (n - 1)]^{0,5} \quad (\text{Equação 5})$$

A soma deve ser levada com valores de $i = 1$ até n .

Na prática, um limite de probabilidade de 0,05 é adotado tanto para carga quanto para a resistência do material, o que implica uma variação de 1,64 a partir da média. Assim, a relação entre a carga de projeto (F_d) e a carga característica (F_k) é tal como mostrada na figura a seguir.

$$F_d = \gamma_f * F_k$$

(Equação 6)

Onde γ_f é o fator parcial de segurança como representado na figura a seguir.

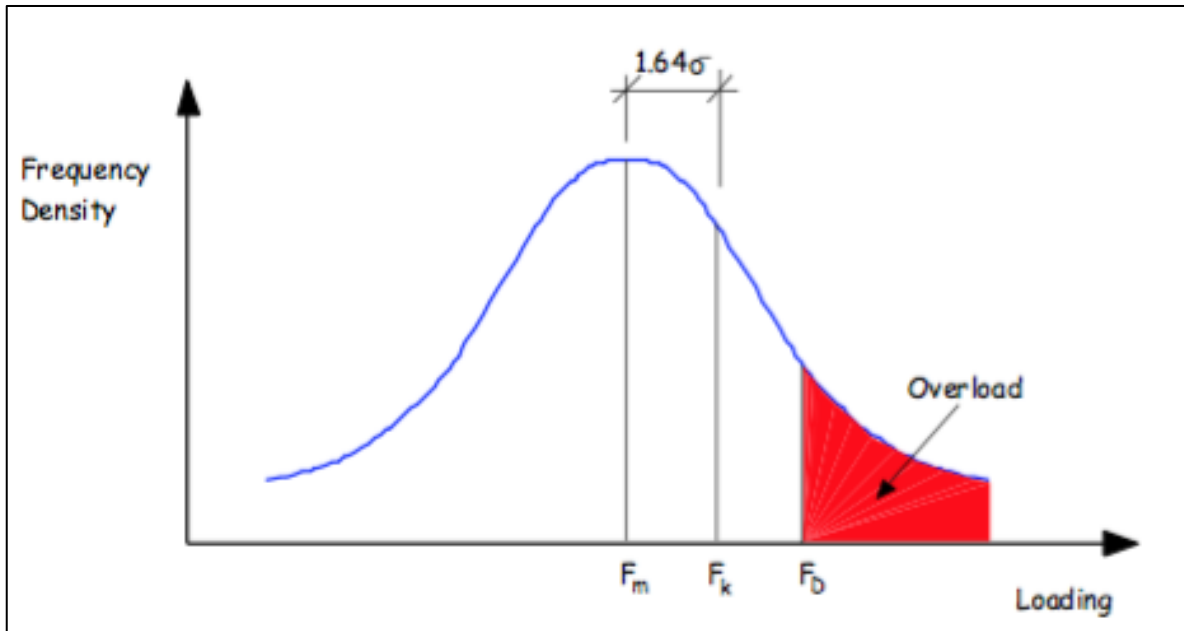


Figura 3.7 - Curva de Gauss para carga de cálculo (GRCA, 2015)

Da mesma forma, a relação entre a força de cálculo (f_d) e resistência característica (f_k) é dada pela eq. (7):

$$f_d = f_k / \gamma_m$$

(Equação 7)

Onde γ_m é um fator de segurança parcial como representado na figura a seguir.

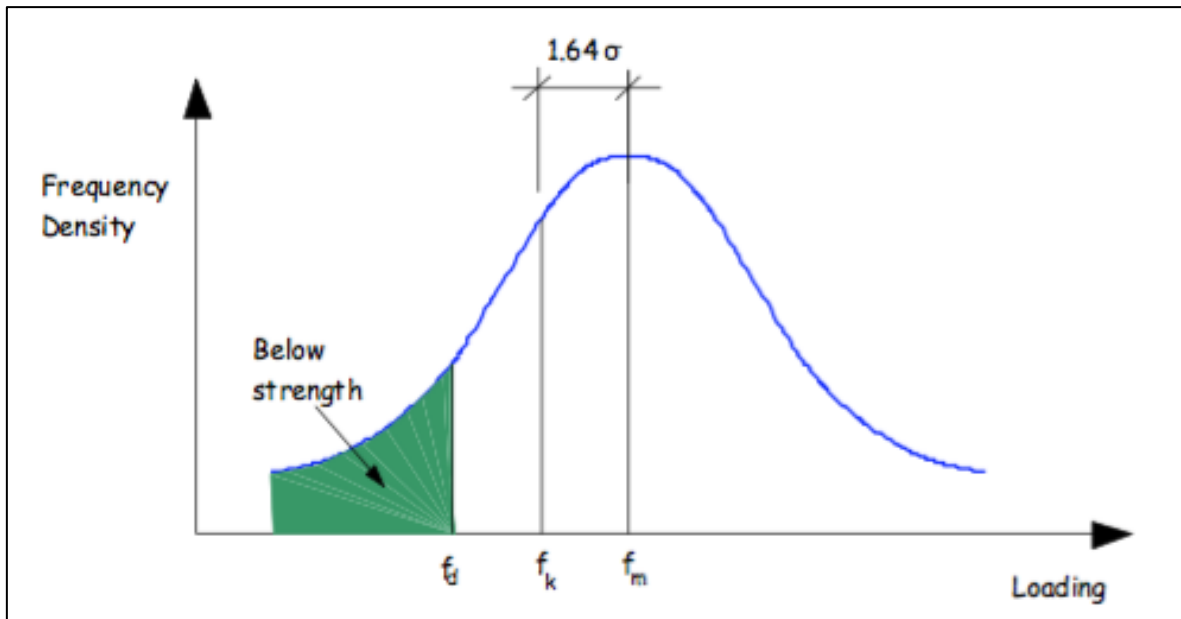


Figura 3.8 - Curva de Gauss para resistência de cálculo (GRCA, 2015)

3.2.2 Fatores parciais de segurança

Ao usar a teoria de estado limite para projetar elementos de GRC, o projetista deve fazer a verificação no estado limite último e de serviço. Em outras palavras, os elementos de GRC não devem ser permitidos a entrar em colapso ou se tornarem inutilizáveis durante a sua vida útil de projeto. Os fatores parciais de segurança serão diferentes para cada estado limite conforme descrito abaixo (GRCA, 2015).

3.2.3 Estado limite último

Para entrar em conformidade com o estado limite último (ELU) devem ser atendidas tais exigências:

- majorar a carga característica (F_k) a fim de obter a carga de cálculo (F_d);
- minorar a resistência característica do GRC (f_k) para obter a resistência de cálculo (f_d);
- fazer a análise do elemento GRC usando estes fatores calculados.

Temos, da eq. (6) a carga de cálculo:

$$F_d = \gamma_f * F_k$$

Onde F_k é a carga característica e o fator de segurança γ_f é dado pela eq. (8):

$$\gamma_f = \gamma'_f * \gamma_{tv} * \gamma_b * \gamma_c \quad \text{(Equação 8)}$$

Onde:

γ'_f = definido pela combinação das cargas e o tipo, definido pela tabela a seguir.

Tabela 3.1 - Tabela para definir γ'_f (adaptado de GRCA, 2015)

Combinação de carga	Tipo de carga					
	Carga permanente		Carga accidental		Terra e pressão d'água	Vento
	Desfavorável	Favorável	Desfavorável	Favorável		
CP + CA (terra e pressão d'água)	1.4	1.0	1.6	0	1.4	-
CP + Vento (terra e pressão d'água)	1.4	1.0	-	-	1.4	1.4
CP + CA + Vento (terra e pressão d'água)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

γ_{tv} = fator que leva em consideração a variação na espessura do GRC, definido pela tabela 9.

Tabela 3.2 – Valores típicos para determinação de γ_{tv} para ELU (adaptado de GRCA, 2015)

Processo de fabricação	Painel skin		Painel sandwich	
	Plain	Moldado	Plain	Moldado
Hand spray (10mm espessura mínima)	1.05	1.1	1.1	1.2
Machine spray (6 mm minimum thickness)	1.05	1.05	1.05	1.1

γ_b = fator que considera as diferenças da resistência à flexão de corpos de prova na seção completa, definido pela tabela 10.

Tabela 3.3 – Tabela 10: Valores típicos para γ_b no ELU (adaptado de GRCA, 2015)

Espessura total (mm)							
Single Skin				Sandwich Construction (*)			
06 – 10	12 - 16	20	40	60	100	200	300
1.0	1.05	1.08	1.15	1.20	1.5	1.37	1.50

(*) Para painel sanduíche aberto ou seção em caixa adotar $\gamma_b = 1.5$, independentemente da profundidade

γ_c = fator que considera o modo do colapso e as consequências desta falha.

Usualmente, γ_c é utilizado como 1.0, mas valores entre 1.0 e 1.5 podem ser apropriados para certas aplicações (GRCA, 2015).

Para a resistência de cálculo (f_d) temos a eq. (7)

$$f_d = f_k / \gamma_m$$

Onde:

f_k = resistência característica e γ_m = fator parcial de segurança.

Valores para γ_m são dados na tabela abaixo:

Tabela 3.4 – Valores típicos para γ_m no ELU (adaptado de GRCA, 2015).

Dosagem	Exposição (longa duração)		Transporte 28 a 90 dias (curta duração)
	Clima natural - externo	Como armazenado - interno	
GRC padrão com relação areia/cimento 1:1	3 a 3.5	2.5 a 3	1.7 a 2.2

3.2.4 Estado limite de serviço

Para entrar em conformidade com o estado limite de serviço (ELS) devem ser atendidas tais exigências:

- determinar carga característica (F_k) a fim de obter a carga de cálculo de serviço (F_{sd}), com um fator de segurança $\gamma_f = 1$;
- minorar a resistência característica do GRC (f_k) para obter a resistência de cálculo (f_d) dividindo pelo fator global de $\gamma_g = 1.8$ para cargas de longa duração e $\gamma_m = 1.4$ para cargas de curta duração ;
- fazer a análise do elemento GRC usando estes fatores calculados.
- verificar o estado limite de serviço de flecha usando F_k e $\gamma_f = 1$ e um valor adequado de Módulo de Young (E). Uma estimativa da flecha devido ao arqueamento térmico e / ou de humidade deve ser adicionado à deformação elástica de cálculo para se obter um valor total para as deflexões. Flechas de longo prazo devem ser limitadas a eq. (9), enquanto flechas sob cargas de ensaio de curto prazo devem ser limitadas a eq. (10).

$$y < L/350 \quad \text{(Equação 9)}$$

$$y < L/625 \quad \text{(Equação 10)}$$

Onde L é o vão que o elemento GRC está apoiado.

3.2.5 Tensões térmicas e retração

Deve-se levar em conta que a retração e os movimentos térmicos podem causar tensões muito elevadas no elemento GRC, pois o GRC tem uma taxa relativamente alta de retração, como podemos ver na seção 3.4.5. A avaliação de valores apropriados para tensões de retração deve considerar cuidadosamente o

ambiente em que o produto GRC será instalado. As condições secas geralmente causam tensões de maior encolhimento comparado às condições úmidas (GRCA, 2015).

Já os fatores que influenciam os esforços induzidos pelos movimentos térmicos são o coeficiente de expansão, o módulo de elasticidade, as estirpes resultantes de um diferencial de temperatura e os efeitos da fluência / relaxamento (GRCA, 2015).

Valores da tensão por retração e da tensão térmica podem ser retirados das tabelas a seguir, conforme as condições do elemento GRC.

Tabela 3.5 – Valores sugeridos para Tensão de retração (σ_{ss}) em N/mm² (adaptado de GRCA, 2015)

Restrição completa	Curta duração	Longa duração
Interna	1.3 a 1.8	0.7 a 0.9
Externa	1.0 a 1.5	0.5 a 0.8

Tabela 3.6 - Valores sugeridos para tensão térmica (σ_{ts}) em N/mm² (adaptado de GRCA, 2015).

Condição	Face tensionada	Gradiente de temperatura (deg C)	σ_{ts}
Inverno	Úmido	5	0.4 a 0.8
		10	0.9 a 1.7
		15	1.4 a 2.5
Verão	Seco	5	0.2 a 0.5
		10	0.4 a 0.9
		15	0.6 a 1.3
		20	0.8 a 1.8

3.2.6 Flexão

Como citado na seção 2.4.2 existem dois valores a resistência à flexão para o GRC, o limite de proporcionalidade (LOP) que marca o fim da variação linear entre a tensão e deformação. Depois disso, a tensão aumenta mais depressa do que a deformação que encerra em falha no assim chamado módulo de ruptura (MOR), como visto na figura a seguir. O LOP e o MOR são ambos afetados principalmente pelo teor de fibra de vidro, comprimento de fibra e sua orientação, teor de polímero e a densidade do composto (GRCA, 2015).

Conforme o GRC envelhece, o LOP pode aumentar ligeiramente o seu valor, enquanto o MOR perde resistência. Durante um longo período de tempo, os dois valores convergem praticamente com o mesmo valor, tal como indicado na figura a seguir.

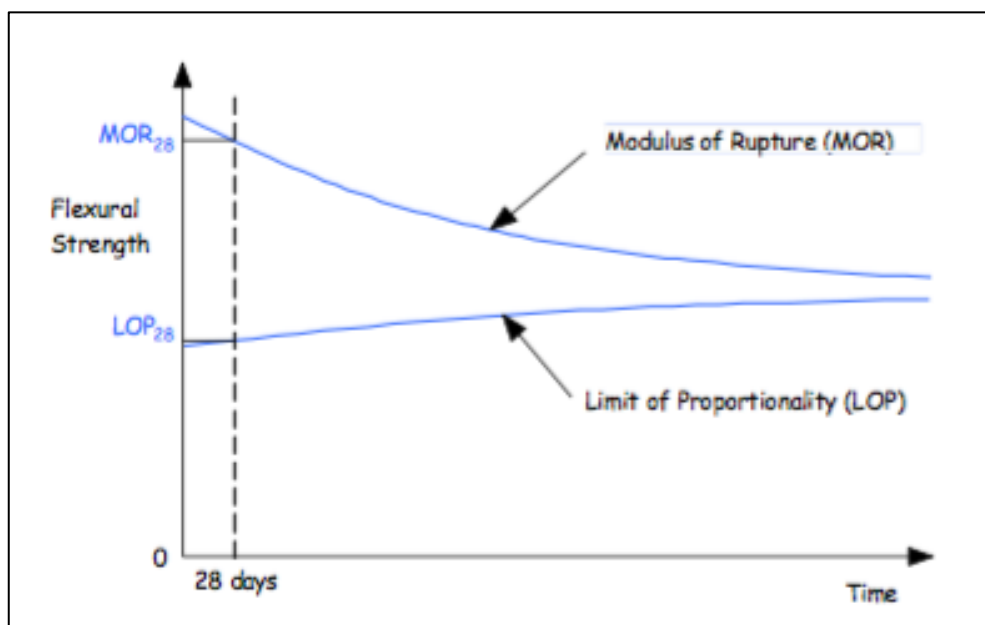


Figura 3.9 – As resistências do GRC no decorrer do tempo (GRCA, 2015)

Flexão é geralmente o estado mais crítico e predominante de carga a considerar no projeto de elementos de GRC. Na concepção de elementos de GRC submetidos exclusivamente à flexão e ao cisalhamento, a resistência característica para o estado limite último é tomado como o módulo de ruptura aos 28 dias (MOR28). A resistência característica no estado limite de serviço é tomada como o limite de proporcionalidade aos 28 dias (LOP28) (GRCA, 2015).

3.2.7 Cisalhamento

O cisalhamento raramente controla o projeto de elementos de GRC. Os três tipos básicos de cisalhamento são o cisalhamento interlaminar, cisalhamento in-plane e o cisalhamento de perfuração, ilustrados na

figura a seguir. A tensão de cisalhamento deve ser limitada a $0,4 \times$ resistência à flexão final do GRC (GRCA, 2015).

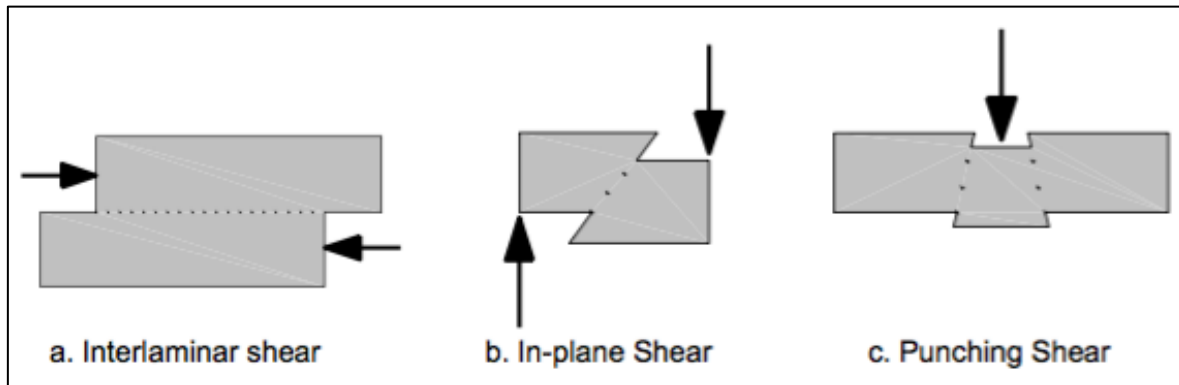


Figura 3.10 – Tipos de cisalhamento estudados no GRC (GRCA, 2015)

O cisalhamento interlaminar é, geralmente, a mais crítica de todas as condições de cisalhamento. Um valor característico de $3,5 \text{ N/mm}^2$ é um valor de projeto razoável para um GRC devidamente compactado e curado, para chegar ao valor da resistência de cálculo deve ser dividido pelo fator de segurança $\gamma_m = 1,7$, portanto a tensão a ser usada para o projeto de cisalhamento é 2 N/mm^2 (GRCA, 2015).

Um valor típico de f_k e γ_m para ser usado para o projeto de cisalhamento in-plane de um GRC padrão pode ser $f_k = 9 \text{ N/mm}^2$ e $\gamma_m = 2$, portanto a resistência de cálculo será $4,5 \text{ N/mm}^2$. Valores de tensão de cisalhamento de perfuração variam entre 20 N/mm^2 e 45 N/mm^2 . Devido à influência significativa de métodos de ensaio, propõem-se cálculos da tensão de cisalhamento de punção de forma conservadora, adotando o mesmo valor que o utilizado para o cisalhamento in-plane (GRCA, 2015).

3.2.8 Resumo do roteiro de cálculo para ELU e ELS

Foram desenvolvidos dois fluxogramas de roteiros de cálculo, um para ELU e outro para ELS, explicitando tudo que foi mencionado acima.

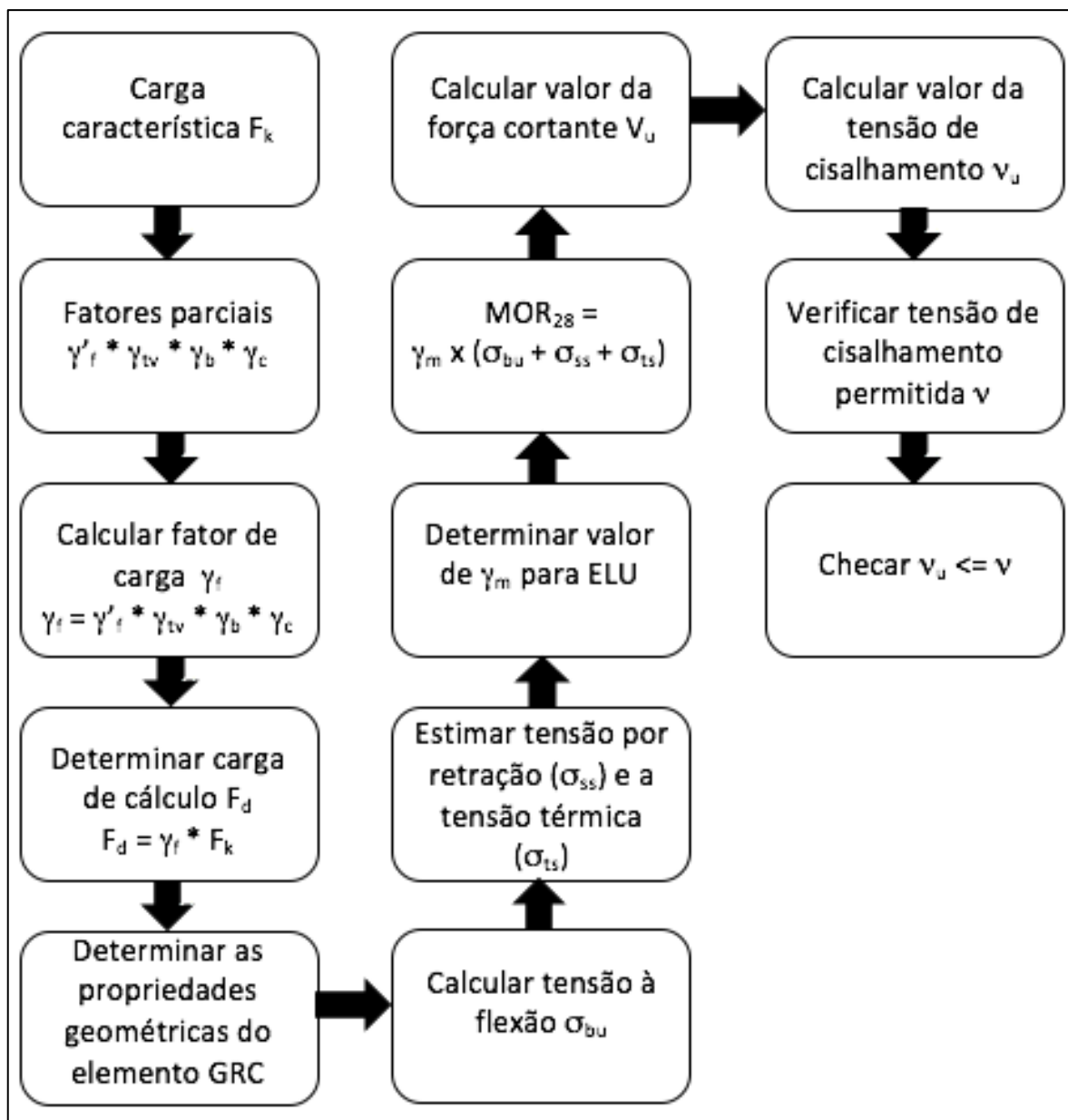


Figura 3.11 – Fluxograma de cálculo no ELU (adaptado de GRCA, 2015)

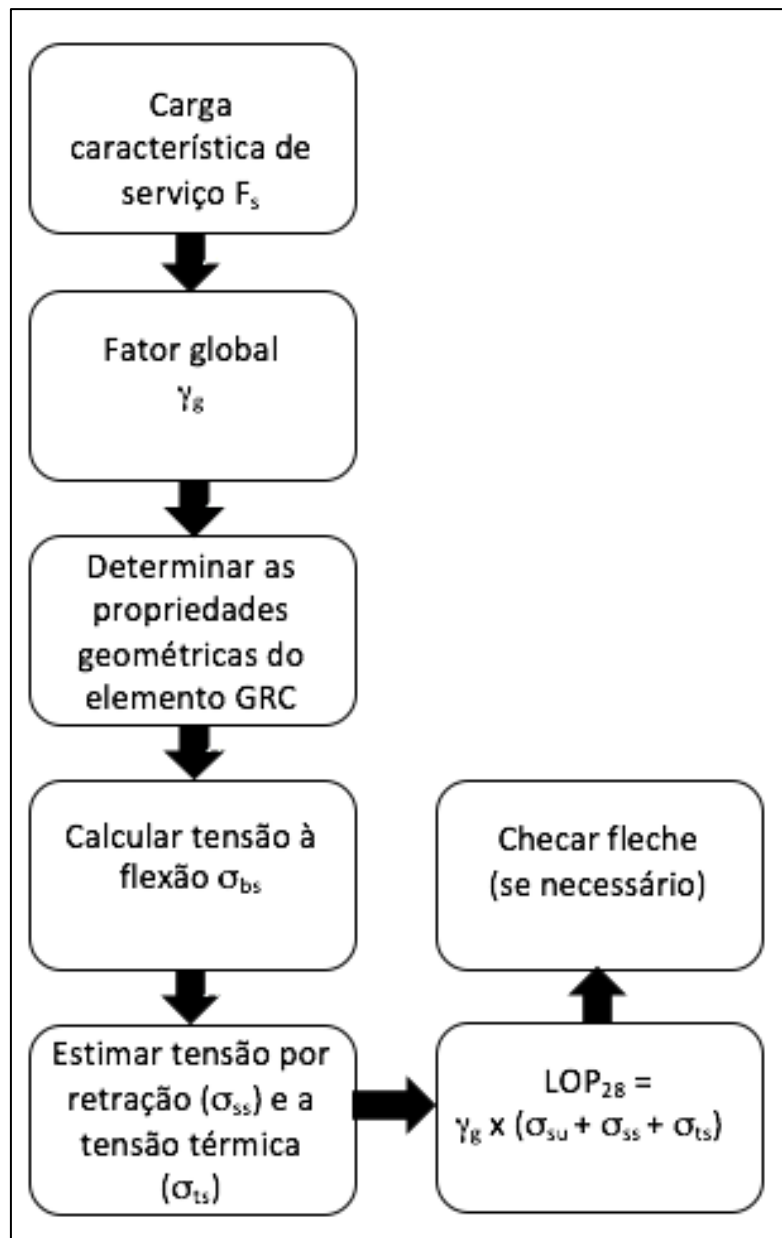


Figura 3.12 – Fluxograma de cálculo no ELS (adaptado de GRCA, 2015)

4 ESTUDO DE CASO: DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS PRÉ-FABRICADOS EM GRC PARA VEDAÇÃO DE UM EDIFÍCIO

4.1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho foi escolhido fazer o dimensionamento de painéis pré-fabricados em GRC, do tipo sanduíche, para vedação de um edifício fictício. Foi concebido um edifício modelo com cálculos de pré-dimensionamento de concreto armado.

Para a concepção do edifício foram tomados alguns cuidados, como:

- criar uma estrutura modular, ou seja, a distância entre os pórticos serem sempre iguais, a fim de facilitar o dimensionamento dos painéis
- adotar todas as vigas, pilares e lajes do mesmo tamanho

O edifício é composto pelo térreo e mais 3 andares, como pode ser visto no anexo II.

O método de dimensionamento utilizado foi o de Estado Limite, com os coeficientes propostos pelo manual da Glass Reinforced Cement Association.

Os painéis serão do tipo sanduíche com isolante térmico de poliestireno expandido.

4.2 DADOS DA ESTRUTURA

A estrutura é modular, com 4 módulos para a vista frontal e 4 módulos para a vista lateral, como pode ser visto nos anexos I e II.

E as dimensões dos elementos da estrutura podem ser vistos na Tabela 14.

Tabela 4.1 - Dados da estrutura

Elementos	Dimensões
Laje	15 cm
Viga	(30 x 70) cm
Pilar	(30 x 30) cm

4.3 DIMENSIONAMENTO DO PAINEL

Para começar o dimensionamento é necessário desenvolver o projeto arquitetônico do painel. Foram tomadas como base informações da revisão bibliográfica para os primeiros esboços das dimensões do painel.

Para facilitar a produção e instalação em obra, o painel foi concebido do mesmo tamanho de cada módulo do edifício, ou seja, 4.00 metros de largura e 3.15 metros de altura, com uma janela de 1.20 x 1.00 metros, conforme a figura a seguir.

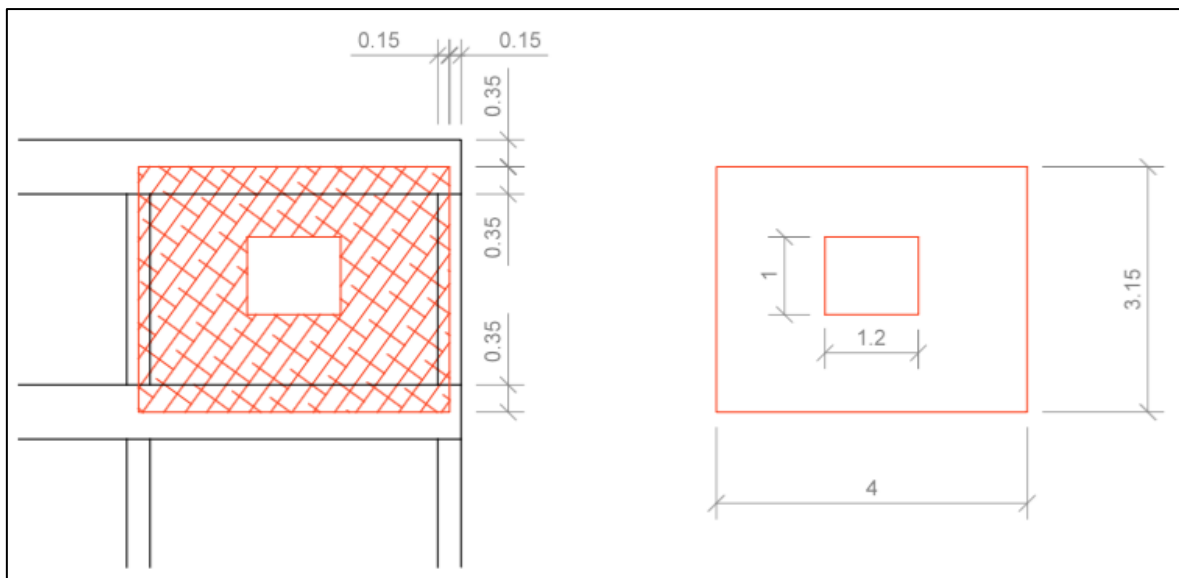


Figura 4.1 - Detalhe do painel na estrutura e suas dimensões (Acervo próprio)

É um painel relativamente grande, nas bibliografias é recomendada a utilização de painéis de até 12 m² a fim de facilitar o manuseio e o transporte, porém veremos a frente que é possível a sua fabricação.

Os limites do painel são posicionados na metade da altura das vigas e no centro dos pilares, a fim de facilitar a ligação com a estrutura.

Para chegar a espessura do painel foram levados em consideração a inércia da seção, que será importante para o cálculo da tensão à flexão, e o desempenho frente ao conforto térmico e acústico. Por ter sido adotado painel do tipo sanduíche, o núcleo do painel será de um isolante térmico, neste caso o poliestireno expandido (EPS).

Para aumentar a inércia da seção e reagir bem a efeitos térmicos é muito importante que as duas faces do painel sanduíche estejam interligadas com nervuras de GRC. Portanto a espessura do painel sanduíche ficou com 10 centímetros de EPS e duas peles de GRC de 2,5 centímetros, com nervuras ligando as duas peles de GRC de 3 centímetros, o corte com todas as cotas se encontra no anexo III, e o esquema pode ser visto na figura a seguir.

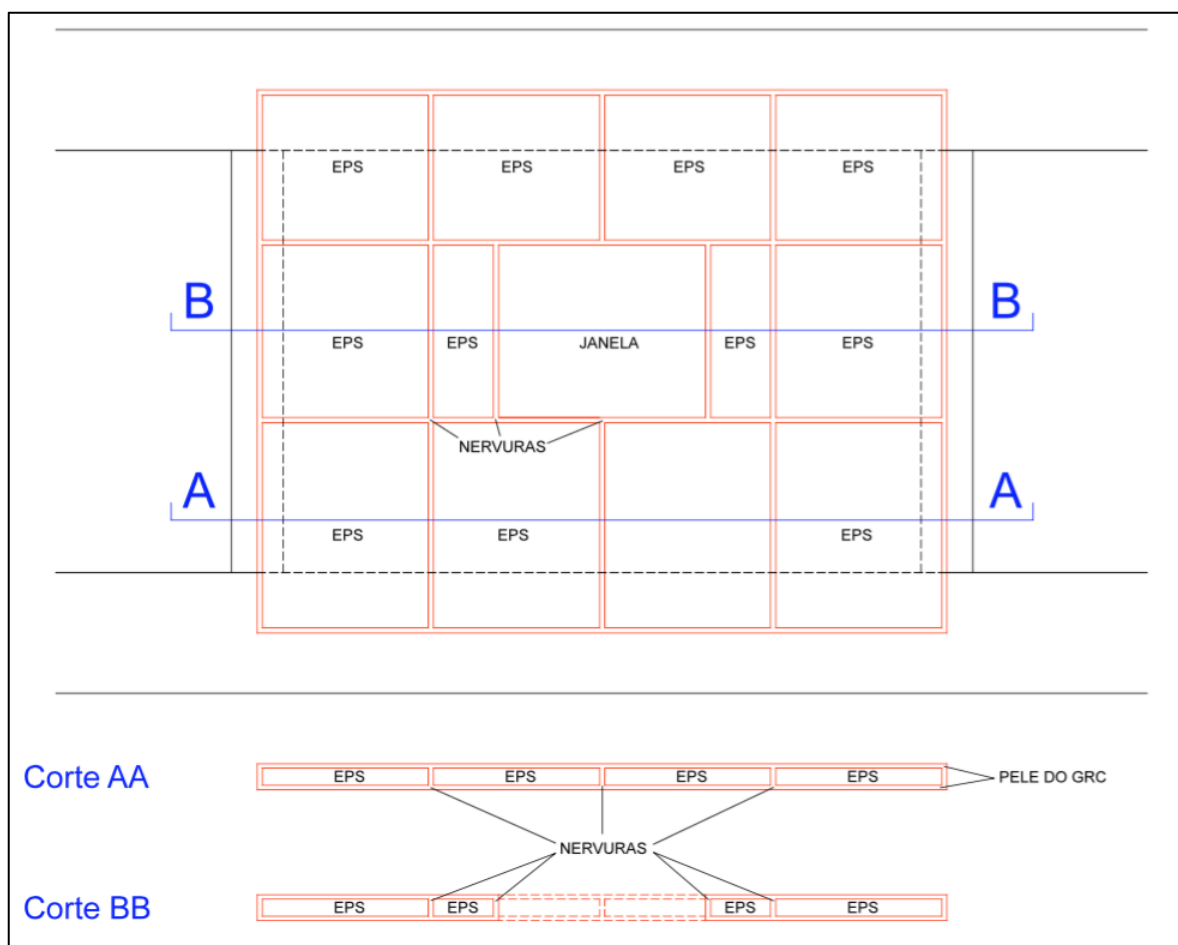


Figura 4.2 - Detalhamento do painel de GRC com cortes da seção transversal (Acervo próprio)

4.4 VERIFICAÇÃO PARA O ESTADO LIMITE ÚLTIMO

Com as dimensões do painel é possível verificar a sua integridade em relação ao Estado Limite Último. Então será seguido o roteiro de cálculo mostrado na figura 3-11.

4.4.1 Determinar carga característica

A carga que atuará no painel será a do vento, adotaremos um vento de 144 km/h, o mesmo que 40 m/s, um valor considerado alto.

Para convertermos este valor em pressão, devemos usar a eq. (11):

$$Q = V^2/16 \quad \text{(Equação 11)}$$

Onde V é a velocidade em m/s.

Utilizando a eq. (11), obtemos uma carga de 100 kgf/m².

Distribuindo esta carga para o painel todo, pois devemos considerar que a janela esteja fechada, temos:

$$Q_k = 100 * 4,00 = 400 \text{ kgf/m}$$

$$\text{Ou } Q_k = 4 \text{ N/mm}$$

4.4.2 Fatores parciais de segurança

Para majorar a força característica e chegar na força de cálculo devemos adotar os fatores parciais de segurança. Serão usados os valores típicos conforme o manual da GRCA.

$$\gamma_f = 1,4 \text{ (Conforme a Tabela 8, combinação de carga permanente e vento)}$$

$$\gamma_{tv} = 1,2 \text{ (Conforme a Tabela 9, painel sanduíche moldado)}$$

$$\gamma_b = 1,31 \text{ (Conforme a Tabela 10, espessura total de 150 mm)}$$

$$\gamma_c = 1,0$$

4.4.3 Fatores da carga de cálculo

Para majorar a força característica e chegar na força de cálculo devemos calcular o fator da carga de cálculo multiplicando os fatores parciais de segurança, conforme a eq. (8).

$$\gamma_f = \gamma_f * \gamma_{tv} * \gamma_b * \gamma_c$$

$$\gamma_f = 1,4 * 1,2 * 1,31 * 1,0 = 2,2008$$

4.4.4 Determinar carga de cálculo

A carga de cálculo é obtida através da eq. (6), onde se multiplica a carga característica pelo fator da carga de cálculo.

$$Q_d = \gamma_f * Q_k$$

$$Q_d = 2,2008 * 4 = 8,8032 \text{ N/mm}$$

4.4.5 Características geométricas

Devemos calcular o momento de inércia da seção mais crítica e o seu módulo resistente, a fim de calcular a tensão à flexão.

A seção mais crítica será a que tiver o menor valor de inércia. No caso deste painel será a seção BB que está ilustrada na figura 4-2, pois é onde a janela se encontra.

O cálculo da inércia e do módulo resistente se deu por uma tabela auxiliar, que consta no anexo IV. Importante ressaltar que a área constituída por EPS não foi considerada no cálculo de inércia, o calculo é realizado como se não tivesse nada preenchendo o núcleo do painel.

$$I_x = 289583333,3 \text{ mm}^4$$

$$W = 3861111,111 \text{ mm}^3$$

$$A = 158000 \text{ mm}^2$$

4.4.6 Calcular tensão à flexão

Com o valor da carga de cálculo e o módulo resistente é possível chegar ao valor da tensão máxima à flexão na seção.

Primeiro deve ser calculado o valor do momento máximo no painel, considerando que o painel seja uma viga bi-apoiada e o seu vão seja a altura do painel, pois os apoios serão de um piso para o outro.

$$M_{\text{máx}} = (Q_d * L^2)/8 \quad \text{(Equação 12)}$$

Substituindo os valores obtidos na eq. (12) tem-se:

$$M_{\text{máx}} = (8,8032 * 31502)/8 = 10.918.719 \text{ N*mm}$$

Para o cálculo da tensão será utilizada a eq. (13)

$$\sigma_{bu} = M_{\text{máx}}/W \quad \text{(Equação 13)}$$

$$\sigma_{bu} = 10.918.719/3861111,111 = 2,83 \text{ N/mm}^2$$

4.4.7 Fator da resistência de cálculo

Para calcular a resistência de cálculo deve-se primeiro achar o seu fator de segurança, pela Tabela 11 temos:

$\gamma_m = 3$ (Clima natural, exposição externa)

4.4.8 Determinação das tensões térmica e de retração

As tensões térmicas e de retração são adotadas conforme os valores do manual da GRCA. Pelas tabelas 12 e 13 tem-se:

$$\sigma_{ss} = 0,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{ts} = 1,4 \text{ N/mm}^2$$

4.4.9 Cálculo do módulo de ruptura aos 28 dias (MOR_{28d})

Com todos os valores obtidos, é possível especificar o módulo de ruptura aos 28 dias pela eq. (14):

$$MOR_{28d} = \gamma_m * (\gamma_{bu} + \gamma_{ss} + \gamma_{ts}) \quad \text{(Equação 14)}$$

Substituindo os valores obtidos anteriormente na eq. (14) tem-se:

$$MOR_{28d} = 3 * (2,83 + 0,8 + 1,4) = 15,09 \text{ N/mm}^2$$

4.4.10 Cálculo da força cortante V_u

Para o cálculo da força cortante usaremos a equação eq. (15) para obter o valor máximo, considerando o painel uma viga bi-apoiada com vão de 3,15 metros.

$$V_u = (Q_d * L^2) \quad \text{(Equação 15)}$$

$$V_u = (8,8032 * 3150) / 2 = 13865,04 \text{ N}$$

4.4.11 Cálculo de tensão de cisalhamento

A tensão de cisalhamento será calculada pela eq. (16), onde divide-se a força cortante máxima pela área da seção.

$$\nu_u = V_u / A \quad \text{(Equação 16)}$$

$$\nu_u = 13865,04 / 158000 = 0,08775 \text{ N/mm}^2$$

4.4.12 Verificar tensão de cisalhamento permitida

Para verificar a tensão de cisalhamento é preciso comparar o valor da tensão de cisalhamento máxima com 40% do limite de proporcionalidade aos 28 dias, conforme a eq. (17).

$$\nu_u * \gamma_m < LOP_{28d} * 0,4 \quad \text{(Equação 17)}$$

Segundo o manual da GRCA $\gamma_m = 1,7$.

$$LOP28d > (0,08775 * 1,7) / 0,4$$

$$LOP28d > 0,373 \text{ N/mm}^2$$

4.5 VERIFICAÇÃO PARA O ESTADO LIMITE DE SERVIÇO

Com as dimensões do painel é possível verificar a sua integridade em relação ao Estado Limite de Serviço. Então será seguido o roteiro de cálculo mostrado na figura 26.

4.5.1 Determinar carga de cálculo

A carga de cálculo é obtida através da eq. (6), onde se multiplica a carga característica pelo fator da carga de cálculo.

Para o estado limite de serviço o valor de γ_f é igual a 1,0.

$$Q_d = \gamma_f * Q_k$$

$$Q_d = 1,0 * 4 = 4 \text{ N/mm}$$

4.5.2 Fator global de segurança

Para calcular a resistência de cálculo deve-se primeiro achar o seu fator global de segurança, conforme descrito na seção 4.2.4.

$$\gamma_g = 1,8 \quad (\text{Carga de longa duração})$$

4.5.3 Cálculo da tensão à flexão

Com o valor da carga de cálculo e o módulo resistente é possível chegar ao valor da tensão máxima à flexão na seção.

Primeiro deve ser calculado o valor do momento máximo no painel, considerando que o painel seja uma viga bi-apoiada e o seu vão seja a altura do painel, pois os apoios serão de um piso para o outro.

$$M_{\text{máx}} = (Q_d * L^2) / 8 \quad (\text{Equação 12})$$

Substituindo os valores obtidos na eq. (12) tem-se:

$$M_{\text{máx}} = (4 * 31502) / 8 = 4.961.250 \text{ N*mm}$$

Para o cálculo da tensão será utilizada a eq. (13)

CAPÍTULO 4

$$\sigma_{bs} = M_{\max}/W$$

$$\sigma_{bs} = 4.961.250/3861111,111 = 1,285 \text{ N/mm}^2$$

4.5.4 Determinação das tensões térmica e de retração

As tensões térmicas e de retração são adotadas conforme os valores do manual da GRCA. Pelas tabelas 12 e 13 tem-se:

$$\sigma_{ss} = 0,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{ts} = 1,4 \text{ N/mm}^2$$

4.5.5 Cálculo do limite de proporcionalidade aos 28 dias (LOP_{28d})

Com todos os valores obtidos, é possível especificar o limite de proporcionalidade aos 28 dias pela eq. (18):

$$LOP_{28d} = \gamma_g * (\sigma_{bs} + \sigma_{ss} + \sigma_{ts}) \quad (\text{Equação 18})$$

Substituindo os valores obtidos anteriormente na eq. (18) tem-se:

$$LOP_{28d} = 1,8 * (1,285 + 0,8 + 1,4) = 6,273 \text{ N/mm}^2$$

4.5.6 Verificação da flecha

O limite da flecha deve ser calculado pela eq. (9), onde o L é o vão em que o elemento GRC está apoiado.

$$y < L/350 \quad (\text{Equação 9})$$

$$y < 3150/350 = 9 \text{ mm}$$

Portanto a flecha não deve ser maior do que 9 mm.

Para calcular a flecha atuante deve-se usar a eq. (19), onde E é o módulo de elasticidade do GRC.

Será adotado valor de E para um GRC padrão, em torno de 15 GPa.

$$Y = (5 * Q_d * L^3 / 384 * E * I) \quad (\text{Equação 19})$$

$$Y = (5 * 4 * 3150 * 3150^3 / 384 * 15000 * 289583333,3) = 1,18 \text{ mm}$$

4.6 RESULTADO E DISCUSSÃO

O resultado do cálculo solicita um GRC com 15,09 MPa de MOR_{28d} e 6,273 MPa de LOP_{28d}. Seria um GRC grade 8/18, conforme visto na revisão bibliográfica, estas resistências são referentes a um GRC comum. Portanto, seria possível fabricar um painel desta dimensão.

Em muitos países não existe documento técnico que regulamenta a forma de dimensionamento de elementos de GRC, por isso muitos profissionais adotam o método proposto pelo GRCA, objeto de estudo deste trabalho.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Com a constante busca da racionalização da construção, por meio de sistemas construtivos inovadores capazes de reduzir o tempo, custo e a agressão ao meio ambiente, os sistemas de vedação vertical ganham mais atenção na construção civil, pois existem poucas alternativas aos métodos convencionais para este fechamento.

Neste contexto, os painéis pré-fabricados em GRC aparecem como uma solução, pois o produto apresenta os benefícios de ser pré-fabricado aliado a sua pequena espessura e peso, aliviando as cargas na estrutura. Além disso, é capaz de atender as exigências de desempenho de fachada, como o conforto térmico e acústico, por conta das diversas formas dos painéis receberem isolantes.

Entretanto, o GRC já não é um produto recente, porque começou a ser difundido amplamente após a descoberta das fibras de vidro álcali resistente, no fim da década de 70, que resolveu de certa forma os problemas com relação a maior fraqueza do GRC naquela ocasião, que era a degradação das fibras de vidro de boro na matriz alcalina do cimento. Todas as propriedades do GRC, tanto mecânicas quanto químicas, se mostraram capazes de atender as solicitações nas quais são submetidas. Destaca-se a resistência à flexão, principal propriedade considerada em projeto, que atinge um valor maior comparado ao concreto convencional.

O sistema de fabricação dos painéis pré-fabricados em GRC varia conforme a resistência desejada e o tipo de painel, mas de uma forma geral se mostra uma produção simples e confiável.

O método de dimensionamento estudado é simples e parecido com o dimensionamento de elementos conhecidos de concreto armado, como vigas e lajes. Entretanto, mesmo com um relativo tempo de difusão no mercado e muitas obras executadas com êxito, inclusive arrojadas arquitetonicamente, o GRC carece de normas emitidas por associações reguladoras, o que dificulta a especialização e o engajamento de novos projetistas.

Portanto, para acelerar a difusão do GRC no mercado deve-se investir em estudos técnicos e normatização dos métodos de dimensionamento, pois somente assim passará confiança aos projetistas para desenvolverem seus projetos especificando o GRC.

5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No mundo todo não existe regulamentação em torno do cálculo de estruturas de GRC, entretanto existem diversas publicações de associações técnicas, como a americana PCI (Precast Concrete Institute), a britânica GRCA (International Glassfiber Reinforced Concrete Association) e a australiana NPCAA (National Precast Concrete Association Institute). A abordagem deste trabalho se restringiu ao desenvolvimento dos cálculos propostos pela GRCA, porém em trabalhos futuros poderiam ser feitas comparações de todos os métodos, para avaliar os parâmetros destes mecanismo de cálculo, qual é o mais conservador, complexo ou econômico.

Fora do âmbito de dimensionamento, outros estudos poderiam ser desenvolvidos, como ensaios práticos comparando os métodos produtivos, a fim de avaliar qual método se torna mais econômico, o spray-up ou premix, levando em consideração que os diferentes métodos utilizam distintas dosagens de fibra de vidro que acarretam em variadas resistências.

Visto isso, percebe-se que existem inúmeras frentes possíveis de pesquisa, desde o dimensionamento até a produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15306-5:2005: Produtos pré-fabricados de materiais cimentícios reforçados com fibra de vidro - Método de ensaio Parte 5: Medição da resistência à flexão, método "ensaio completo de flexão". Rio de Janeiro: Abnt, 2005. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9062: Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado. Rio de Janeiro, 2006. 42 p.

BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. Fibre Reinforced Cementitious Composites. 2. ed. London: Taylor & Francis, 2007.

Cem-Fil Ltd., Cem Fil GRC Technical data; 1 ed. Madrid, Espanha, Cem-Fil Fibres; 1999. 88p.

COMINO, P. I.; ROMERO, J. C.. EL GRC Material Compuesto de Matriz Cimenticia reforzado con fibra de vidrio AR. In: CURSO DE ESTUDIOS MAYORES DE LA CONSTRUCCIÓN, 2007, Madrid. Anais... . Madrid: Instituto de Ciencias de La Construcción Eduardo Torroja,, 2007. p. 459 - 477.

FACCIO, Juliano Ferrari. Fachadas Pré Fabricadas em GRC. 2004. 117 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2004.

GLASSFIBRE REINFORCED CEMENT ASSOCIATION - GRCA. Practical Design Guide for GRC. Wigan, The Glassfibre Reinforced Cement Association, 2015. 98pp.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. CONCRETO: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008. 674 p.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J.M.. CONCRETO: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 4. ed. São Paulo: Ibracon, 2014. 751 p.

NATIONAL PRECAST CONCRETE ASSOCIATION AUSTRALIA. DESIGN, MANUFACTURE AND INSTALLATION OF GLASS REINFORCED COCNRETE (GRC): A recommended practice. Sydney: Techmedia Publishing Pry Ltd, 2006.

OCV REINFORCEMENTS (Espanha) (Org.). Guide to Spray Manufacture. Madrid:

Ocv Reinforcements Alcala Spain Sl., 2008. 33 p. 33 f.

OLIVEIRA, Luciana Alves de. (2002). Tecnologia de painéis pré-fabricados arquitetônicos de concreto para emprego em fachadas de edifícios. Dissertação de Mestrado – São Paulo: USP/Escola Politécnica

ORDONÉZ, J. A. F. (1974) Pre-fabricacion: teoría y práctica. Barcelona: Editores Técnicos Asociados. v.1.

PERUZZI, Antônio de Paulo. Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento portland modificada com látex e adição de sílica ativa. 2002. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

POSSAN, Edna. Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano. 2010. 263 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PRISZKULNIK, Simão. AGLOMERANTES INORGÂNICOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL. São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2011. 29 f.

REGÁS, Francisco Javier; BOLAÑOS, Juan Carlos. Piedra Moldeada: GRC y Hormigón Arquitectónico. Barcelona: Encuadernaciones Mármol S.l., 2007.

REVISTA PINI. Abrainc e Fipe lançam indicador com dados nacionais sobre lançamentos e vendas de imóveis. 2015. Disponível em: <<http://construcaomercado.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/negocios/abrainc-e-fipe-lancam-indicador-com-dados-nacionais-sobre-lancamentos-362415-1.aspx>>. Acesso em: 10 dez. 2015.

SILVA, Vanessa Gomes da. Diretrizes para o Projeto de Painéis de Fachada em Cimento Reforçado com Fibras de Vidro. 1998. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

VAHIDI, E.k.; MALEKABADI, M.m.. GRC and Sustainable Building Design. In: GRC 2011, 16., 2011, Istanbul. Artigo. Istanbul: Grca International, 2011. p. 1 - 7. Disponível em: <http://www.grca.org.uk/pdf/congress-2011/2_GRC_and_Sustainable_Building_Design.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2016.

ANEXOS

ANEXO I – PLANTA DE FORMA DO EDIFÍCIO

ANEXO II – VISTA FRONTAL/LATERAL

ANEXO III – DETALHAMENTO DO PAINEL

ANEXO IV – TABELA DE PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS