



FACULDADE DE ARQUITECTURA
UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA

ESTRATÉGIAS DE MODELAÇÃO 3D DE CONTEXTOS ARQUITECTÓNICOS A PARTIR DE VARRIMENTO LASER 3D



Mestre em Arquitectura
Pedro Duarte Ramos Cecília Rebocho Lima

Dissertação
Estratégias de modelação 3D a partir de Varrimento Laser 3D

Orientador Científico:
Doutor Francisco José de Almeida Santos Agostinho

Júri:

Presidente: Doutor Pedro Miguel Gomes Januário

Vogais:

Doutor Francisco José de Almeida Santos Agostinho
Doutor Luís António dos Santos Romão





FACULDADE DE ARQUITECTURA
UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA



O logótipo que criei para este trabalho de dissertação de Mestrado, teve como objectivo sintetizar numa representação simples, o universo em estudo.

Assim a imagem do monumento sintetiza a Arquitectura. O facto de escolher um templo romano prende-se com o Tempo na Arquitectura, que é tão importante, quanto a mim, como o Espaço. O templo representa o legado arquitectónico que civilizações antigas nos deixaram.

Depois compus este desenho simplesmente com o 'código binário' do lado direito.

Assim pretendi dar um mote de informática/tecnologia digital relacionada com a Arquitectura.

Agradecimentos

aos meus pais, Maria Inês e Fernando, pelo apoio que me deram nos momentos de maior, mas também nos de menor inspiração ou desmotivação, e que sempre acreditaram em mim.

Aos meus padrinhos José e Maria Celeste.

Aos meus colegas e amigos, Mónica, Susana, Inês, João, Miguel, Hugo.

Ao meu Professor Orientador Francisco Agostinho e Professores Assistentes Luís Mateus e Victor Ferreira.

A todos os professores da Faculdade de Arquitectura da UTL que contribuíram directa ou indirectamente para a minha formação académica.

Índice

1. Introdução	4
2. Varrimento Laser 3D e Prototipagem Rápida – Historial e estado da arte	12
2.1. Varrimento Laser	12
2.2. Prototipagem Rápida	16
3. Varrimento Laser	20
3.1. Métodos de Captura 3D	21
3.2. Método do ‘Tempo-de-Voo’	22
3.3. <i>Merging</i> – fusão/junção de várias nuvens de pontos	23
3.4. Vincular a geometria à sua textura	23
3.5. Da nuvem de pontos à modelação e reconstrução de superfícies	24
3.5.1. Classificação da reconstrução algorítmica	25
3.6. Conversão dos pontos em superfícies	27
3.6.1. Pré-processamento	28
3.6.2. Triangulação ou geração de malhas (<i>meshes</i>)	28
3.6.2.1. Triangulação 2D	29
3.6.2.2. Triangulação 2.5D	29
3.6.2.3. Superfícies para modelos 3D	30
3.6.3. Triangulação 3D	30
3.6.4. Operações de pós-processamento	30
3.7. <i>Software</i> de modelação	31
3.8. Visualização	32
3.8.1. Modos de apresentar modelos 3D	33
3.8.2. Pacotes de visualização e formatos de ficheiros 3D	35
3.8.3. Animação e navegação interactiva de modelos 3D	37
3.8.3.1. VRML (<i>Virtual Reality Modeling Language</i>)	37
3.8.3.2. Open Graphics Library (<i>OpenGL</i>)	38
3.8.3.3. <i>Skyline</i>	38
3.9. Compressão de dados geométricos	38
4. Prototipagem Rápida	40

4.1. Vantagens da Prototipagem Rápida	42
4.2. CNC (<i>Computer Numeric Control</i>) ou Prototipagem Rápida?	42
4.3. Stereolithography – SLA (estereolitografia)	43
4.3.1. Processo gráfico da SLA	44
4.4. Laminated Object Manufacturing – LOM (fabricação de objectos laminados)	45
4.4.1. Processo gráfico da LOM	45
4.5. Fused Deposition Modeling – FDM (modelação por deposição de líquido fundido)	46
4.5.1. Processo gráfico do FDM	47
4.6. Selective Laser Sintering – SLS (sinterização)	48
4.6.1. Processo gráfico do SLS	49
4.7. Three Dimensional Printing – 3DP (impressão tridimensional)	50
4.7.1. Processo gráfico da 3DP	50
4.8. Solid Ground Curing – SGC	51
4.8.1. Processo gráfico da SGC	52
4.9. Inkjet Methods (impressão a jacto-de-tinta)	54
4.9.1. Sanders ModelMaker™	54
4.9.2. Multi-Jet Modeling™	55
5. Desenvolvimento prático do exercício relativo à Capela de S. Frutoso de Montélios, Braga	58
5.1. Capela de São Frutuoso de Montélios – um pouco de história	59
5.2. Desenvolvimento do trabalho prático	61
6. Construção do modelo em 3D – Programa <i>Rhinoceros 4.0</i> – “Do Real ao Protótipo”	66
6.1. Tratamento das malhas	70
6.2. Construção dos <i>troços-de-fachada</i>	75
6.3. Construção das coberturas	83
6.4. Verificação das malhas e conversão para formato <i>.STL</i>	86
6.5. Visualização do ficheiro com o programa <i>MiniMagics 2.0</i>	89
6.6. <i>STLFIX</i> – Correção on-line automática dos modelos	93
7. Produção das peças através de Prototipagem Rápida	98
7.1. O ‘ <i>Makerbot</i> ’	99
8. Conclusões	104
9. Glossário	108

10. Glossário de Figuras	111
11. Bibliografia	117
12. Links Úteis	118

Anexos

Nota: todos os termos com **asterisco (*)**, encontram-se brevemente explicados no *Glossário*, **pág. 45**



ESTRATÉGIAS DE MODELAÇÃO 3D DE CONTEXTOS ARQUITECTÓNICOS, A PARTIR DE VARRIMENTO LASER 3D

1. Introdução

A presente dissertação de Mestrado Integrado em Arquitectura, da Faculdade de Arquitectura de Lisboa, tem como tema “Estratégias de modelação 3D de contextos arquitectónicos a partir de varrimento Laser 3D”.

O desenvolvimento do trabalho e os resultados enquadram-se no Projecto de Investigação FCT:PTDC-AUR-66476-2006 “Contributos para o projecto de conservação do património arquitectónico – metodologia documental na fotogrametria digital e na digitalização 3D terrestres” (<http://archc3d.fa.utl.pt/>).

Objecto do trabalho

O objectivo da escolha do tema para tese de Mestrado em “ESTRATÉGIAS DE MODELAÇÃO 3D DE CONTEXTOS ARQUITECTÓNICOS E VARRIMENTO LASER 3D”, prende-se sobretudo com a investigação, exploração e aproveitamento de ferramentas digitais, como ajuda, complemento e apoio ao entendimento de contextos arquitectónicos produzidos ao longo da História, bem como meio de rentabilizar o projecto de arquitectura nas suas vertentes de conservação e restauro, ou como meio de divulgação do património construído.

Enquadramento do tema

Este tema enquadra-se nos dois universos que são o VL3D (varrimento laser 3D) e a PR (prototipagem rápida). Estes dois universos podem funcionar distintamente, como também podem fazer parte de um percurso contínuo de um qualquer estudo ou produção de um contexto arquitectónico, antigo, actual ou virtual.

Assumindo a era que atravessamos, a era da informação rápida e acessível a praticamente qualquer pessoa e em quase tempo real, qualquer campo da ciência tira partido deste universo digital, permitindo perceber o objecto de estudo, através de novas perspectivas, que podem melhorar o entendimento do mundo ‘*quadridimensional*’ onde o Homem existe e interage.

A Ciência precisa de compreender os fenómenos e para os compreender precisa de ferramentas, muitas delas altamente complexas, que só até há pouco tempo, por exemplo, nos fizeram ter uma mais alargada ideia do Universo *espacio-temporal*.

A Arquitectura é também um campo da ciência, e como tal é complexa. Qualquer ferramenta que venha ajudar a entender, a criar, a produzir e a analisá-la, é sempre uma mais-valia.

Um dos casos de estudo do projecto de investigação acima referido foi a Capela de S. Frutuoso de Montélios localizada em Braga. Nesse contexto foram feitos levantamentos desse objecto através de metodologias diversas, entre as quais o varrimento laser 3D. Um dos resultados produzidos foi a construção de uma modelo 3D virtual do exterior da capela conforme se ilustra na figura.



Fig. 1 — Imagem em 3D da Capela de S. Frutuoso de Montélios

Justificação do tema

Desde que tive pela primeira vez contacto com as novas tecnologias de informação, com as novas ferramentas digitais que nos apoiam na resolução de problemas laborais ou pessoais, foi surgindo o interesse e a vontade de as explorar. Explorá-las, como já afirmei atrás, não no sentido de resolverem totalmente os problemas (neste caso os da Arquitectura), mas no sentido de me ajudarem como uma das várias ferramentas de apoio, sobretudo ao projecto, à produção e desenvolvimento das ideias.

O Varrimento Laser 3D surgiu durante os anos 90, sobretudo através de grandes empresas ligadas à recolha de informação geográfica (ex. N.A.S.A.).

Por exemplo, hoje temos uma base de dados geográfica global do nosso planeta e outros, graças ao VL3D feito através de satélites em órbitas em torno da terra.

Hoje em dia, qualquer pessoa que possua um PC com acesso à internet, pode descarregar o *Google Earth*® em minutos, senão em segundos, e passado em média menos de uma hora, tem um mapeamento global, geográfico, geológico, ecológico, meteorológico, etc., num pequeno programa distribuído gratuitamente na internet e instalado no seu PC, portátil, telemóvel, PDA. Tudo isto graças a várias metodologias de recolha e mapeamento geográficos em que se inclui o VL3D.

A Medicina entende hoje melhor a estrutura tão complexa do corpo humano, graças a esta tecnologia, aplicando-a por ex., no campo das próteses.

Os dados recolhidos por VL3D permitem operações de *'Engenharia Reversa'* ou *'Engenharia Inversa'* porque tal como o termo indica, é o processo inverso da criação de um objecto técnico que foi projectado e onde foi resolvido um problema formal, funcional e material. As propriedades formais do objecto ou parte do objecto são capturadas para um ambiente tridimensional.

Assim este processo reversivo permite ‘desmontar’ os vários processos operativos durante a sua concepção, para se procederem por exemplo, a melhoramentos e novas versões de peças, para demonstração do seu princípio de funcionamento ou para operações de redesenho.

Como a Arquitectura também se pode considerar uma estrutura complexa criada pelo Homem ao longo do tempo, interessa saber até que ponto se pode tirar partido da combinação das tecnologias de varrimento laser e da prototipagem rápida.

O 3D é uma ferramenta que já acompanha a arquitectura há vários anos. Hoje em dia faz parte dos vários passos na produção arquitectónica, havendo cada vez mais programas CAD específicos para a arquitectura.

O 3D age como um interface ou uma ‘âncora’ entre estas duas tecnologias em estudo. Os dados que se recebem do VL3D são tratados num ambiente tridimensional. A fabricação de modelos ou de uma maquete de arquitectura, através da PR, são fornecidos através do 3D.

Existe portanto uma ligação entre estas duas tecnologias embora tenham finalidades diferentes.

Em contextos arquitectónicos o VL3D insere-se fundamentalmente como um meio de estudo, conservação e catalogação do património. Com o varrimento é possível fazer um levantamento arqueológico mais preciso do que com medições ou levantamentos fotográficos.

Existem vários exemplos de trabalhos que utilizaram o VL3D para reconstrução de estruturas. O caso concreto que mencionarei de seguida, não se trata propriamente da reconstrução de um objecto arquitectónico, mas sim de todas as operações envolvidas para a reconstrução de uma formação rochosa na Baía de Santander, Espanha. Engloba as duas tecnologias a serem estudadas e os processos operativos utilizados. Foi tema de estudo e de interesse por parte de várias escolas de arquitectura incluindo a Faculdade de Arquitectura da U.T.L., mais propriamente no campo da reabilitação.

Integrado no projecto Arch3D - Contributos para o Projecto de Conservação do Património Arquitectónico, o II Seminário Internacional sobre Conservação, Restauro e Reabilitação; Metodologias de Levantamento, teve lugar na Faculdade de Arquitectura da U.T.L. no dia 29 de Maio de 2009, onde foi convidado o Prof. Juan José Martinez da Universidad de Valladolid. O Prof. Juan José Martinez fez uma apresentação de todos os processos realizados para a reconstrução da “Isla Horadada” através do VL3D e auxílio de prototipagem rápida.

A “Isla de La Horadada” ou “Peña (rocha) de La Horadada” é uma formação rochosa que emerge sobre a superfície do mar na baía de Santander frente à península de “La Magdalena”. A ilha este exposta às intempéries e marés desde a sua formação, que terão escavado o seu arco através da erosão.

Em 2005 depois de um forte temporal, deu-se o colapso do seu arco, fragmentando-se em vários bocados de rocha que ficaram depositados no fundo.



Fig. 2 – A “Horadada” antes do colapso



Fig. 3 – A “Horadada” depois do colapso

Depois do seu colapso, a Câmara Municipal de Santander mostrou interesse em estudar uma possível reconstrução, circunstância que motivou o desenvolvimento de um projecto de investigação.

Nesse sentido foram realizados trabalhos para se obter a geometria antes da ruptura, estudos de impactos das ondas de maneira a calcular um reforço artificial, caracterização das rochas, do seu material e análise estrutural do arco pétreo.

Foi necessário conhecer a morfologia da ilha no estado colapsado, bem como dos fragmentos que jaziam no fundo do mar e que foram recuperados.

Todo esse processo foi executado através do Varrimento Laser 3D.



Fig. 4 – Recuperação de um dos fragmentos

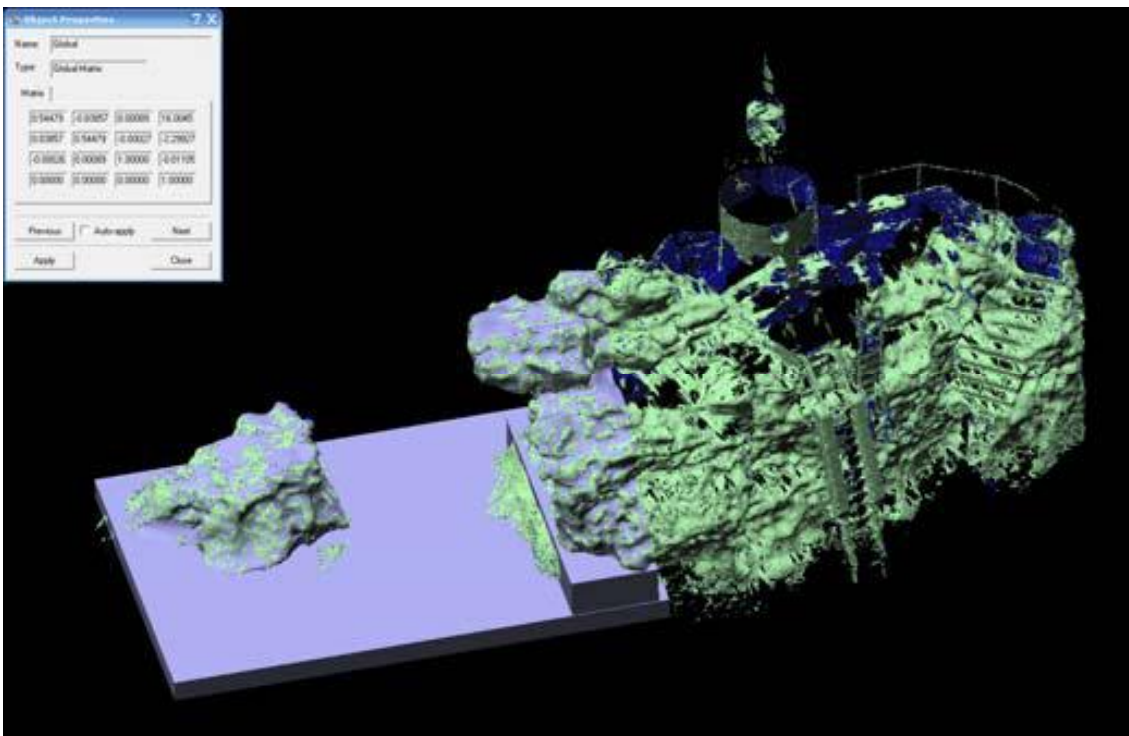


Fig. 5 – Resultado do varrimento laser da ilha em ambiente 3D

Com base em fotografias da ilha previamente à sua destruição, executaram-se modelos prototipados a partir do tratamento em ambiente 3D.



Fig. 6 – Modelo prototipado da ilha – os fragmentos foram colocados de maneira a fidelizar ao máximo a sua morfologia original.

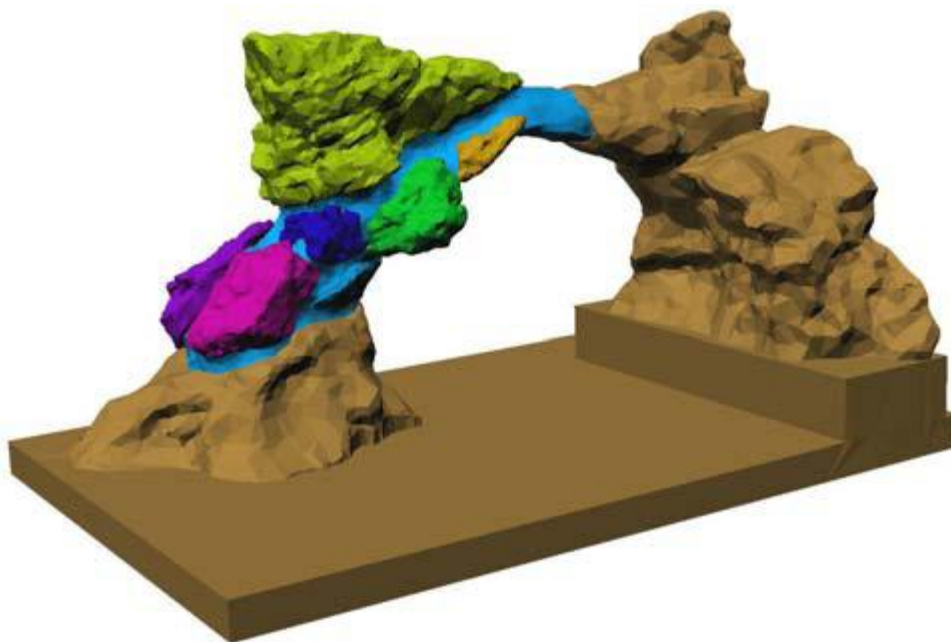


Fig. 7 – Depois de um novo varrimento laser obteve-se a forma definitiva em 3D, para a operação de reconstrução.

Os passos seguintes recaíram essencialmente em cálculos de engenharia, de maneira a reforçar as estruturas artificiais que iriam suportar as rochas e em cálculos de tensão dos materiais.

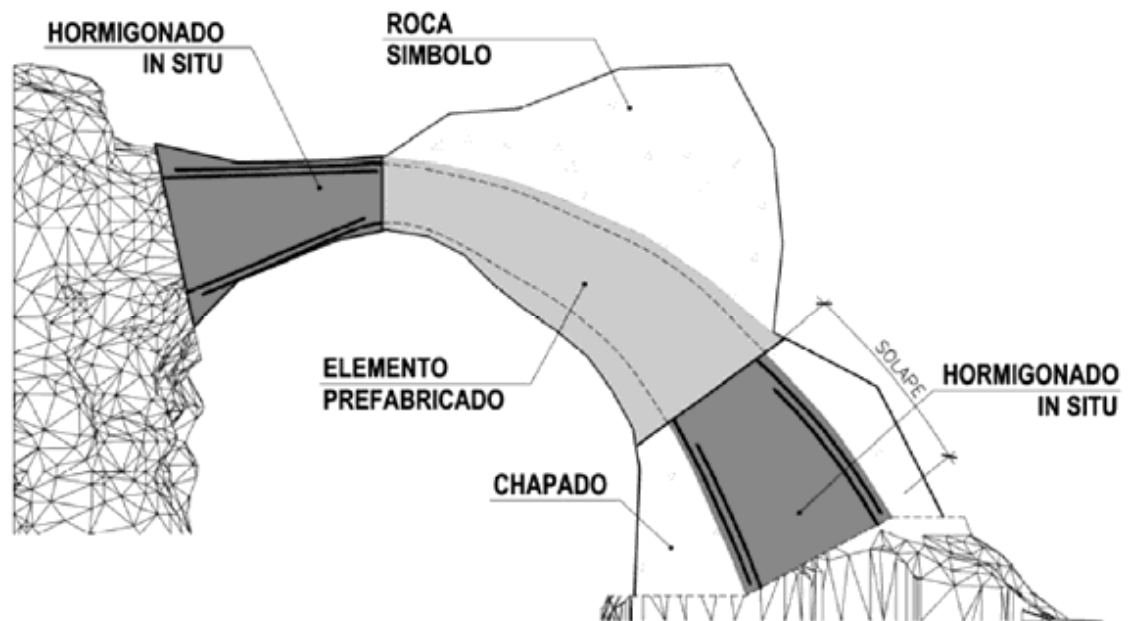


Fig. 8 – Esquema da solução de fixação, à base de um arco de betão armado pré-fabricado. Toda a descrição do trabalho sobre a “Isla de La Horadada” encontra-se em http://grupos.unican.es/gted/archivos/otros/ponencias/rehabend08_horadada.pdf

Depois de ter assistido a esta apresentação do Prof. José Martinez, seguida depois de uma apresentação do Prof. Luís Mateus, um dos meus orientadores, surgiu entusiasmo da minha parte, para explorar estas duas tecnologias, que para mim eram praticamente desconhecidas. Falei com os meus professores, e surgiu o interesse de executar uma dissertação sobre este campo, e da sua articulação em contextos arquitectónicos. Falou-se da parte teórica à base de investigação e entendimento das tecnologias, complementando o trabalho com uma parte prática, culminando na fabricação de um modelo arquitectónico.

Objectivos do trabalho

O domínio de conhecimento em que estas ferramentas se aplicam é a Arquitectura e o Património.

O objectivo do trabalho prende-se essencialmente em investigar e entender as possibilidades de articulação entre o varrimento laser 3D a prototipagem rápida, no campo da Arquitectura e Conservação, como ferramentas de representação, de divulgação, e de suporte ao entendimento e compreensão do objecto construído.

Mais ainda, tentar entender se os dois campos se complementam, se são distintos, se podem fazer parte, como já referi atrás, de um percurso contínuo no estudo de um ou vários objectos arquitectónicos.

Do ponto de vista prático pretende-se definir um fluxo operativo que permita a produção de modelos 3D virtuais adequados à operação de prototipagem rápida, a partir de dados gerados por varrimento laser 3D.

Metodologia proposta

A metodologia assume duas vertentes, uma teórica e uma prática.

Na componente teórica procurámos, através da explanação dos princípios subjacentes a cada uma das tecnologias abordadas, definir e caracterizar os termos a que deve sujeitar-se o fluxo operativo de modelação. Esta recaiu em pesquisas de exemplos publicados na internet, no contacto com empresas do ramo, em conferências dadas por Professores/investigadores ligados ao campo em estudo, na leitura de artigos de referência.

Na componente prática, em que é explicado o percurso do VL3D até à PR, começou-se por tratar o modelo existente da *Capela de S. Frutuoso de Montélios*, através de aplicações de CAD variadas (*AutoCAD, Rhinoceros, Minimagics*) de modo a dotar o modelo dado das características necessárias à prototipagem rápida. Este tratamento implicou a análise das características do modelo base, a definição de uma estratégia de decomposição do objecto em partes, o preenchimento de vazios, e a definição de volumes encerrados.

Salienta-se como componente deste processo a investigação e escolha das aplicações informáticas mais adequadas às várias etapas da estratégia de modelação. Nem todas implementam soluções para todos os problemas encontrados e por isso exige-se uma correcta articulação entre aplicações para que se produza o modelo final com as características desejadas.

Depois do tratamento em ambiente tridimensional virtual, através das aplicações de software referidas, pretende-se preparar o modelo virtual de maneira a ser produzido fisicamente a uma pequena escala, através da prototipagem rápida.

Delimitação do universo de estudo

Como estratégia de abordagem ao problema assumiu-se a divisão do modelo dado em sectores articulados a serem tratados de forma independente. Esta abordagem visou por um lado uma economia na produção do modelo final, através da prototipagem, mas também permitiu ir melhorando iterativamente, a produção de resultados parciais.

Esta escolha prende-se ainda com o limite temporal circunscrito de realização do trabalho e com a necessidade de produzir resultados nesse intervalo de tempo.

Estrutura base da organização da redacção do documento apresentado.

Segue-se a estrutura proposta do documento:

- Introdução
- Varrimento Laser 3D e Prototipagem Rápida – historial e estado de arte
- Estado de Arte do VL3D
- Explicação do VL3D
- Exemplos do VL3D
- Estado de Arte da PR
- Explicação da PR
- Exemplos de vários tipos de PR
- Desenvolvimento prático do exercício relativo à Capela *de S. Frutoso de Montélios*, Braga
- Conclusões
- Glossário
- Glossário de figuras
- Bibliografia
- Links Úteis
- Anexos

2. Varrimento Laser 3D e Prototipagem Rápida – historial e estado da arte

2.1. Varrimento Laser 3D

Há milénios que o Homem procura captar a realidade. Porque é curioso, porque quer saber, porque se intriga com o funcionamento de algo. O Homem necessita de ter a capacidade de controlar o espaço que o rodeia, seja natural ou criado.

Para artistas e artesãos, o progresso tem vindo a criar novas maneiras de produzir as suas ideias ou captar uma miríade de abstracções da natureza.

Com o advento dos computadores foi possível construir modelos altamente complexos, mas o problema advinha da criação desse modelo. Superfícies complexas desafiavam as ferramentas de medição. E ainda hoje continuam a desafiar.

História

A história da captura 3D remonta aos anos 80 em que a indústria desenvolveu um sistema de contacto através de uma sonda. Este aparelho tinha um sensor que ia captando vários pontos do objecto real, e convertia-os em pontos cartesianos num ambiente virtual.

O processo era moroso e a precisão do modelo capturado não era satisfatória, a maior parte das vezes.

Era necessário criar um sistema que conseguisse capturar a mesma quantidade de detalhe, mas a uma velocidade que tornasse a aplicação mais efectiva.

Foi então que peritos começaram a desenvolver a tecnologia óptica.

Usando a luz como meio de captura seria muito mais rápido que o uso de uma sonda física. Isto permitiria a captura de objectos mais complexos. Não haveria contacto entre a sonda e o objecto, conservando assim a sua integridade morfológica.

A óptica disponibilizou então três tipos de tecnologia de captura:

Point Scan – ou varrimento ponto-a-ponto. Era similar à sonda física e utilizava um único ponto de referência, que se repetia várias vezes. Como é óbvio, este era o processo mais lento, já que envolvia muito movimento por parte da sonda.

Area Scan – ou varrimento por área. Esta era uma técnica bastante difícil, pela carência de sistemas de área precisos.

Stripe Scan – varrimento em banda ou faixa de varrimento. Este terceiro sistema cedo revelou ser mais rápido que a sonda, visto usar uma banda de vários pontos que ‘varrem’ o objecto de uma vez. Era também mais preciso e resolvia a demanda de velocidade e precisão durante a operação.

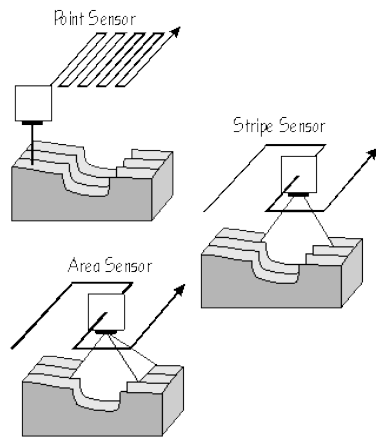


Fig. 9 – 3 Tipos de varrimento – varrimento ponto-a-ponto, em banda e por área.

O caminho a seguir era claramente o varrimento em banda. Mas cedo tornou-se um desafio o programa ou software que o controlasse. Para capturar um objecto em três dimensões, o sensor teria de executar vários varrimentos em diferentes posições. O desafio era juntar depois todos os dados recolhidos, ou as várias nuvens de pontos, remover dados em excesso, dados erróneos, que aparecem inevitavelmente, quando se recolhem milhões de pontos de uma só vez. E fazer tudo isto de uma maneira expedita era outro desafio.

Uma das primeiras aplicações desta tecnologia era a captura da forma humana para a indústria da animação.

Durante os anos 80 a empresa de Los Angeles, *Cyberware Laboratories*, desenvolveu este campo com a sua *Head Scanner*.



Fig. 10 – Tecnologia de captura da forma humana – *Head Scanner*

A mesma empresa continuou a sua pesquisa e em meados dos anos 90 desenvolve a *Full Body Scanner*, ou scanner de corpo inteiro.



Fig. 11 – Tecnologia de captura da forma humana – evolução para *Full Body Scanner*

Foi a partir daqui que os Scanners 3D começam a despertar o interesse geral.

Em 1994 foi lançada a REPLICA, que permitia um varrimento preciso e rápido de objectos detalhados e complexos. A REPLICA marcou seriamente os avanços no varrimento laser em banda.

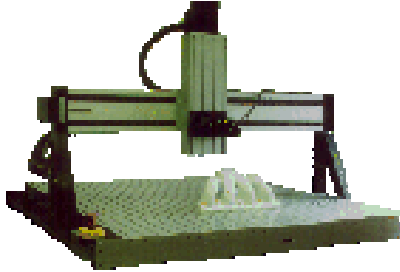


Fig. 12 – Máquina REPLICA que marcou grandes avanços no varrimento laser em 1994

Entretanto a empresa *Cyberware* estava a desenvolver a sua própria linha de scanners de grande detalhe. Alguns destes scanners permitiam também a captura da cor do objecto, o que era notável. Mas apesar deste progresso, o puro varrimento laser 3D ainda era uma miragem.

Outra empresa, a *Digibots*, criou uma máquina de quatro eixos dimensionais que proporcionaria uma captura completa de um modelo, apenas com um único varrimento. Mas esta máquina era baseada em varrimento laser por ponto – e não em banda – e era obviamente um processo lento. Não possuía os seis graus de liberdade necessários para cobrir um objecto no seu todo, nem capturava a cor das superfícies.



Fig. 13 – a máquina da *Digibots* fazia um varrimento completo mas tornava-se lenta por utilizar o método de ponto a ponto

Enquanto que estes scanners ópticos eram caros, as empresas *Immersion* e *Faro Technologies*, introduziam no mercado digitalizadores manuais de baixo custo. Estes podiam efectivamente produzir modelos completos, mas eram lentos, particularmente se o modelo fosse muito detalhado. E também não capturavam a cor das superfícies.

Por esta altura a comunidade de modelação 3D unira-se para tentar criar um scanner que fosse

- Preciso
- Rápido
- Verdadeiramente tridimensional
- Capaz de capturar cor da superfície
- Com um preço adequado às suas funções

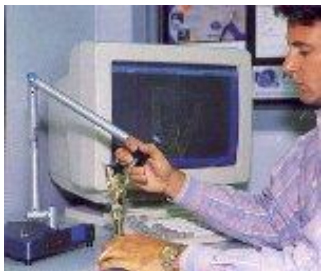


Fig. 14 – Em 1996 a ModelMaker era o sistema mais completo de varrimento combinando um braço móvel e varrimento em banda

Os resultados aparecem em 1996, quando a *3D Scanners* pega nas tecnologias base – braço operado manualmente e varrimento 3D em banda – e combina-as numa nova ferramenta. A *ModelMaker*. A *ModelMaker* integrava o primeiro sistema de captura real e era o sistema mais rápido e flexível no mercado. Capturava a cor e produziu muitos e complexos modelos em três dimensões.



Fig. 15 – *ModelMaker*

Actualmente as várias tecnologias de varrimento laser 3D baseiam-se nestes princípios. Consoante a escala do objecto que se quer capturar existem no mercado todo o tipo de soluções e gamas de preços.

2.2. Prototipagem Rápida

A Prototipagem Rápida é uma tecnologia revolucionária e de grande potencial numa vasta gama de aplicações.

O processo da prototipagem envolve a fabricação rápida de um protótipo ou modelo de trabalho, de maneira a testar as suas características de projecto, a ideia, conceitos, funcionalidades, produção, performance.

De imediato, o utilizador recebe a informação necessária ou 'feedback' do protótipo. E tão ou mais importante que analisar o protótipo através de plantas, cortes, alçados, isometrias ou representações em 3D, é a possibilidade de se poder analisá-lo no ambiente real, através do toque e interagindo com ele.

A prototipagem rápida é uma parte essencial no processo de desenvolvimento projectual.

É sem dúvida bastante benéfica no que diz respeito à redução do custo e risco do projecto.

Tecnologias tradicionais de Prototipagem

As tecnologias tradicionais mais correntes para fabricar protótipos nos mais diversos materiais são as seguintes:

- Modelação manual;
- Maquetismo;
- Carpintaria de moldes;
- Maquinagem CNC*;

Modelação manual

A modelação manual é um processo de prototipagem tradicional, que conta com largos anos de história. Com aparecimento das mais recentes tecnologias de prototipagem, a modelação manual tem vindo a diminuir de importância para a indústria.

Em contraste com outros métodos de prototipagem, este requer do trabalhador uma habilidade muito grande e nalguns casos uma capacidade artística apurada.

O rigor dimensional é reduzido e a duplicação de formas complexas é extremamente difícil de realizar, razão pela qual este processo é essencialmente aplicado no desenvolvimento de projectos de âmbito mais artístico e menos técnico, como é o caso de esculturas.

É contudo ainda muito utilizada numa fase mais embrionária de desenvolvimento de produtos, nomeadamente na fase de design, sendo uma tecnologia que faz parte integrante dos programas leccionados nas escolas de design.

Maquetismo

O maquetismo é um processo de representação bastante antigo, sendo usado com diversas finalidades.

O maquetismo é geralmente associado a modelos reduzidos de projectos de arquitectura e urbanismo.

É comum ver-se maquetas de edifícios com o objectivo de avaliar o seu efeito estético, o seu enquadramento na envolvente e, não menos importante, o de cativar o interesse do público e de clientes na fase de projecto.

Embora o maquetismo seja mais conhecido no campo da representação de arquitectura e urbanismo, é de igual modo utilizado no campo da indústria de modelos de peças, nomeadamente de elevado porte, tais como automóveis, barcos e aeronaves.

Se na Prototipagem Rápida o objecto nasce do projecto, tradicionalmente no maquetismo pode dar-se o inverso, ou seja, o objecto antecede o projecto. O projectista pode iniciar o seu estudo construindo uma maqueta, que vai sendo adaptada às condicionantes até à obtenção do produto final desejado e, só então, passar ao desenho.

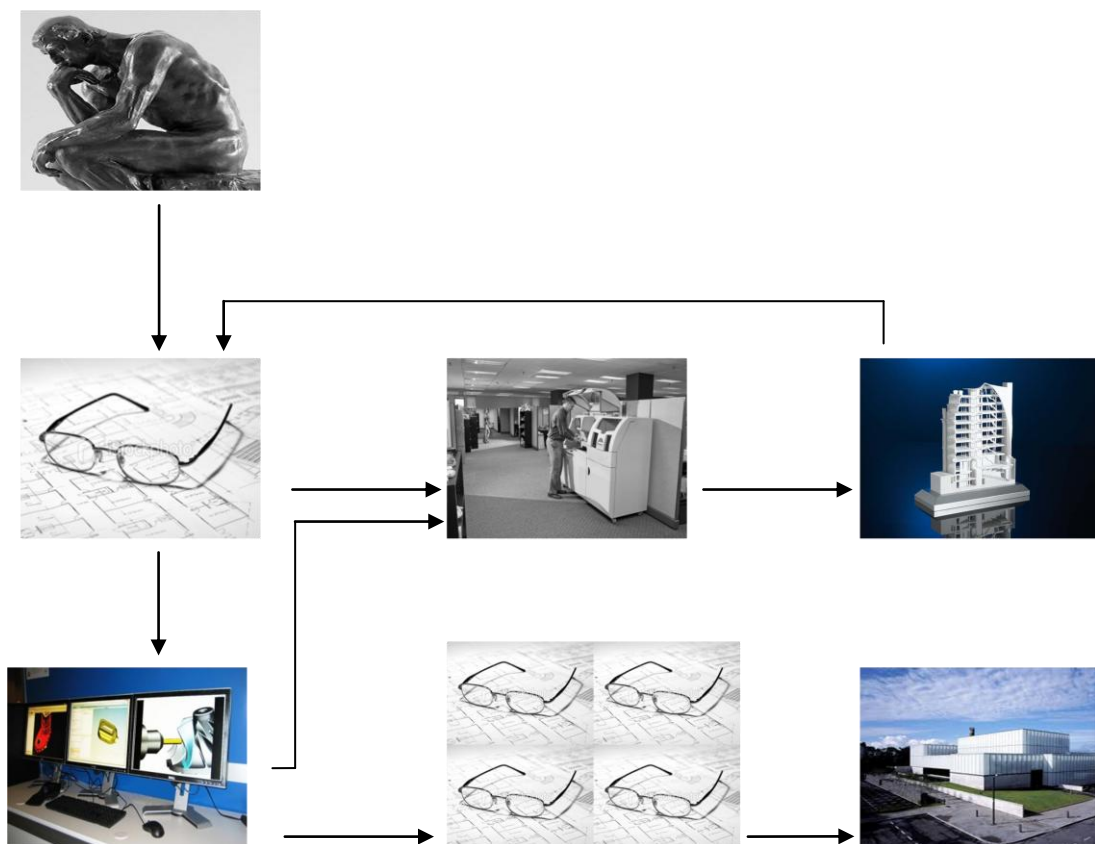


Fig. 16 – Fluxo operativo das fases de projecto arquitectónico – o acompanhamento da prototipagem rápida onde a maqueta antecede o projecto

Carpintaria de Moldes

A carpintaria de moldes é também uma actividade bastante antiga, sendo fundamentalmente usada na fabricação de ferramentas de fundição, tais como moldes e caixas de machos para fundição em areia.

Nos últimos anos, esta actividade tem decrescido substancialmente devido às metodologias envolvidas nesta tecnologia serem algo incompatíveis com o acelerado ritmo de vida actual e do rápido aparecimento de novas tecnologias.

O número de profissionais que trabalham nesta área é baixo, o que se deve essencialmente ao longo período de formação necessário para atingir um nível de qualidade e produtividade razoáveis.

Maquinagem tradicional CNC

A maquinagem tradicional CNC embora não muito recente, quando comparada com as tecnologias de prototipagem rápida, tem-se revelado extremamente competitiva e de grande utilidade para a execução de protótipos.

Esta tecnologia consiste na remoção de material, a partir de um bloco, até ser obtida a forma final.

Os protótipos em CNC tradicional podem ser produzidos em qualquer material e receber vários tipos de acabamentos.

A principal limitação desta tecnologia prende-se com a execução de formas geométricas de elevada complexidade, as quais exigem ferramentas de corte de muito pequena dimensão e a obrigatoriedade de se efectuarem muitas passagens para a obtenção de acabamento com alta qualidade. Isto torna o seu custo extremamente elevado.

A produção de peças finas com esta tecnologia apresenta grandes dificuldades e exige um grande conhecimento de técnicas específicas, bem como pessoal técnico especializado.

A Prototipagem Rápida é conhecida pelos vários termos ou acrónimos a que está associada.

SFF – Solid Freeform Fabrication (fabricação livre de sólidos), FF – Freeform Fabrication, AFF – Automated Freeform Fabrication, impressão 3D, produção de sólidos por camadas, prototipagem a laser e fabricação aditiva.



Fig. 17 – Máquina de prototipagem rápida rápida



Fig. 18 – Exemplo de uma maquete criada a partir de prototipagem rápida

História da prototipagem rápida

Apesar das primeiras técnicas de prototipagem rápida se terem tornado acessíveis no final dos anos 80, a história da prototipagem rápida remonta ao fim dos anos 60, quando o professor de engenharia Herbert Voelcker, se questionou sobre as possibilidades de fazer ‘algo interessante’, recorrendo a ferramentas de máquinas automáticas controladas por computador. Começara a tentar arranjar uma maneira de programar estas máquinas, através de dados de desenhos gerados por computador.

Durante os anos 70, Voelcker desenvolve ferramentas básicas de matemática de maneira a descrever os aspectos tridimensionais, resultando nas primeiras teorias matemáticas e algorítmicas para a modelação de sólidos. Estas teorias formaram a base dos programas de computador modernos, usados na concepção de quase todos os objectos e engenhos mecânicos, desde o mais pequeno carro de brincar até ao mais alto arranha-céus.

Contudo, em 1987, Carl Deckard, um investigador da Universidade do Texas, apareceu com uma ideia revolucionária. Foi pioneiro na fabricação baseada em camadas, onde a construção de um sólido poderia ser feita camada a camada.

Imprimiu então modelos tridimensionais, utilizando luz laser para fundir pó metálico em protótipos sólidos, com uma camada à vez.

Deckard desenvolveu esta ideia e chamou a esta técnica Selective Laser Sintering – SLS (sinterização) e os seus resultados foram extremamente promissores.

A história da prototipagem rápida é relativamente nova e recente, e abrange um vasto campo de aplicações com resultados surpreendentes. Contudo é um campo tecnológico que tem vindo a crescer com grandes avanços mas também com barreiras e entraves.

As descobertas, inovações e investigações por parte de Voelcker e Deckard, deram um significativo impulso nesta nova indústria da prototipagem rápida ou fabricação livre de sólidos. Revolucionaram e redesenharam os processos de criação e fabricação.

Existem, contudo, referências de outros pioneiros no campo da prototipagem rápida. A indústria reconhece Charles Hull como o ‘pai’ desta tecnologia. Charles Hull foi o co-fundador da empresa 3D Systems e patenteou o primeiro processo conhecido de prototipagem rápida - a estereolitografia, também conhecida por SLA – stereolithography apparatus.

A prototipagem rápida nos dias de hoje apresenta várias soluções, de acordo com o tipo, escala e necessidades que se pretendem com processos de criação, modelação CAD e fabricação cada vez mais facilitados e rápidos.

A maioria das máquinas de prototipagem não é acessível, para já, a uma pequena empresa ou a um utilizador privado, mas já existem soluções acessíveis a pensar nos vários nichos de mercado.

Assim como há cerca de pouco mais de 10 anos, ter uma plotter em casa e mesmo num pequeno escritório era um grande investimento. Hoje as plotters são acessíveis para se ter no local de trabalho ou em casa, custando pouco mais que uma impressora cara e com uma qualidade/rapidez de impressão radicalmente superiores.

O mesmo se antevê dentro de algum tempo para a tecnologia da prototipagem rápida, em que, por exemplo, se pode ter uma pequena máquina em casa e permitir que uma criança, através de um software didáctico fabrique os seus brinquedos.

3. Varrimento Laser 3D

O Varrimento Laser 3D ou *3D Capture*, é a extracção ou aquisição de informação do mundo real ou palpável, para um ambiente digital.

Propriedades como a forma, cor, e reflexo das superfícies podem ser obtidas e posteriormente usadas e tratadas em ambiente virtual 3D.

O princípio da captura 3D reside na aquisição de documentação empírica de objectos ou lugares.

Ex. – Utilização em restituição de arquitectura ou objectos arqueológicos, simples reprodução de um objecto ou lugar, recuperação/restituição arquitectónica ou urbanística.

Os dados recolhidos pelos *Scanners 3D** mais recentes são as '**nuvens de pontos**' e informação de cor (**RGB**) *.

As **nuvens de pontos (NP)** são conjuntos de pontos, ordenadas a partir dos eixos cartesianos (X,Y,Z).

Ex. – (0,0,0) é a localização da coordenada de origem. A informação contida na nuvem de pontos é chamada de 'informação de alcance' (*range information*).

As NP são a forma mais básica na representação geométrica em 3D. Uma vez recolhida esta informação, a nuvem de pontos pode ser transformada numa malha, num modelo ou numa massa densa de pontos. Esta informação contida na NP é usada para criar geometrias mais complexas como por ex. *meshes* poligonais* e superfícies paramétricas*.

A informação de cor associada a cada ponto em X,Y,Z pode ser adquirida por vários métodos de captura 3D. A informação de cor é obtida na forma de valores numéricos de acordo com a quantidade de vermelho, verde e azul (RGB), que são os três elementos da cor projectada. Estes três valores de cor são organizados de acordo com os eixos cartesianos no ambiente virtual.

Uma das medidas mais úteis para determinar a resolução da NP é a **densidade da amostragem (sample)**. A densidade de amostragem conta o número de pontos por unidade de área ou distância, por ex. – uma amostra por cada centímetro ou 64 amostras por mm². Quanto maior for a densidade da amostra, mais densa será a NP.

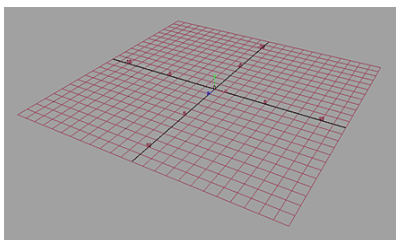


Fig. 19 – espaço tridimensional definido pelas coordenadas X,Y,Z

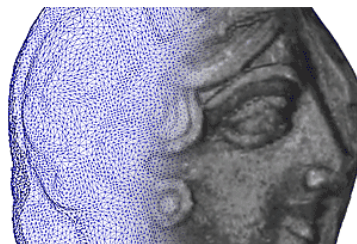


Fig. 20 – Da nuvem de pontos ao modelo 3D

3.1. Métodos de Captura 3D

Existem vários métodos de captura 3D. Os mais utilizados são o *Varrimento Laser*, *Luz Estruturada*, *Fotogrametria* e *Digitalização por Contacto*.

O método em que nos iremos debruçar será o 1.º, o **Varrimento Laser**.

O Varrimento Laser capta pontos localizados através da projecção de um raio laser de baixa intensidade no objecto, e obtendo de seguida o seu reflexo no scanner. Centenas de milhar de pontos até milhões de pontos, podem ser captados a partir de um único varrimento. Isto dependerá também, como é óbvio, das especificações do scanner em uso.

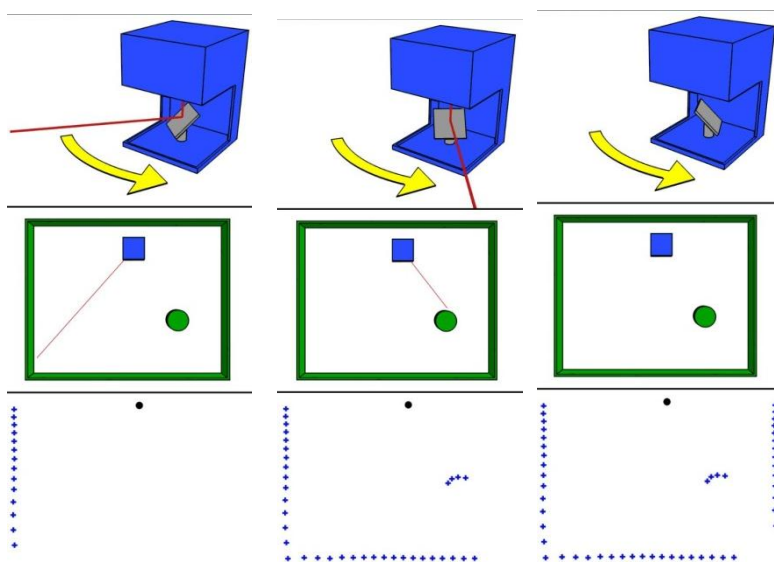


Fig. 21 – Esquema do princípio de funcionamento laser – método do ‘tempo-de-vo’



Fig. 22 – O Scanner com sistema LIDAR* é o sistema normalmente utilizado para varrimento de grandes objectos tais como edifícios, formações rochosas, etc. É baseado no tipo de medição por ‘tempo-de-vo’.

3.2. Método do ‘Tempo-de-Voo’

Este sistema calcula a distância ao objecto contando o tempo de uma *round-trip* (que aqui vou tratar por viagem de *ida-e-volta* de um raio de luz).

O laser emite o raio de luz. A quantidade de tempo antes da luz ser reflectida é medida num detector. Como a velocidade da luz é uma constante c , o tempo da viagem determina a distância da luz, que é 2X a distância entre o scanner e a superfície/objecto.

Sento t o tempo da *viagem*, então a distância é igual a: $(c.t)/2$

O rigor dum *scanner* deste tipo depende da sua precisão em medir o tempo de *viagem* t : 3.3 picosegundos (aprox.) é o tempo que a luz demora a percorrer 1 mm.

Este laser *rangefinder* (distanciómetro) só detecta a distância de um ponto na sua direcção de observação.

Assim, o scanner varre por completo todo o seu campo de visão um ponto de cada vez, mudando o alcance e obtendo vários pontos. Atenção que aqui trata-se de **POV** (*point-of-views* – pontos do observador).

A direcção do laser pode ser mudada através de uma base rotativa montada num tripé ou por um sistema de espelhos rotativos. Este último sistema é geralmente mais utilizado, visto os espelhos serem mais leves e poderem assim ser rodados mais rapidamente e com maior precisão.

O *tempo-de-voo* destes scanners pode medir distâncias entre cerca de 10.000 a 100.000 pontos a cada segundo.



Fig. 23

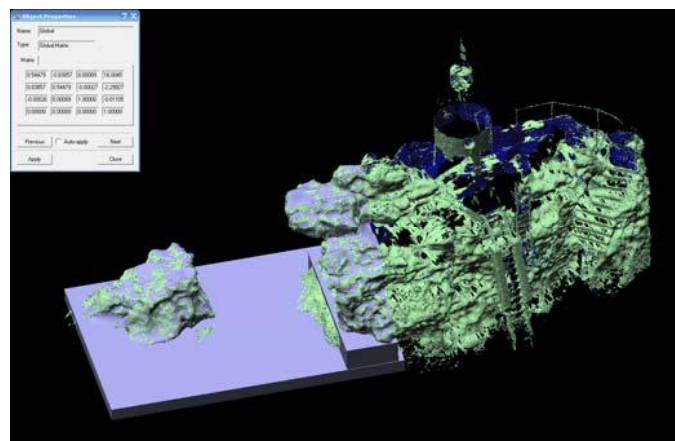


Fig. 24 – Resultado do varrimento - “Isla de La Horadada”

Optech ILRIS-3D Intelligent Laser Ranging and imaging System

Exemplo da máquina usada para o varrimento e posterior estudo da *Isla de la Horadada*, Santander – in “II Seminário Internacional – Conservação, Restauro e Reabilitação – Metodologias de levantamento – Prof. Juan Jose Martinez, Universidad de Valladolid, Espanha”, ‘Cubo’, F.A.U.T.L, 29/05/2009

3.3. *Merging* – Fusão/junção de várias nuvens de pontos

Dado que os vários objectos para captura 3D requerem diferentes posições de varrimento para obter cobertura total, são tidos em conta processos metodológicos de fusão das múltiplas NP, de maneira a que os dados para documentação apresentem coerência para uma visualização de análise científica.

Muitos programas que processam a fusão de múltiplas NP usam o método de cálculo *best-fit* (cálculo automático generalizado de maneira a que os dados processados sejam coerentes). Estes programas comparam a forma característica das NP e tentam alinhá-las com o mínimo de separação e sobreposição possível. Normalmente sendo um processo semi-preciso, esta precisão é variável e decresce em áreas de sobreposição, sem quase nenhuma ou nenhuma mudança nas características da superfície.

A ambiguidade introduzida por esta variável pode tornar confuso o resultado de como a fusão das NP foram obtidas, tornando os dados metodológicos pouco ou nada claros.



Fig. 25 – A vinculação da geometria à sua textura é um processo de tentativa e erro

3.4. Vincular a geometria à sua textura

Se a distância espacial (X,Y,Z) e os valores de cor (RGB) são gravados em conjunto, a informação de cor é registada exactamente com o seu ponto 3D correspondente. O método de captura que gera NP a partir de fotografias digitais a cor e lasers usando comprimentos de onda RGB, juntos podem dar um claro registo da geometria com a sua cor. Quando a informação de cor é adquirida independentemente da informação de distância, como uma fotografia digital separada, a informação de cor tem de ser mapeada à geometria 3D do objecto. Esta técnica, porém não é exacta devido à sua ambiguidade quando se tenta determinar onde mapear a cor.

É um processo de tentativa e erro para posicionar a imagem devidamente na geometria.

3.5. Da Nuvem de Pontos à modelação e reconstrução de superfícies

O objectivo da reconstrução de superfícies pode ser definido como:

numa amostragem, dado um conjunto de pontos P , assumindo que estes se posicionam numa superfície desconhecida S ou perto desta, cria-se um modelo de superfície S' , aproximando-se de S .

O processo de reconstrução de uma superfície não garante a recuperação do S exactamente, já que só temos esta informação de S através de um conjunto finito de pontos de amostragem.

Por vezes informação adicional da superfície (ex. segmentos de recta) pode ser disponibilizada e, em geral, à medida que a densidade da amostra aumenta, o resultado de saída S' é mais correcto topologicamente e converge para a superfície original S .

Uma boa amostragem deve ser densa em detalhe de área e escassa em partes dispensáveis. Normalmente quando os dados introduzidos não satisfazem certas propriedades necessárias pelo *algoritmo** (por ex. boa distribuição e densidade, pouca desorganização – *noise*), o *software* de reconstrução produz dados incorrectos ou mesmo impossíveis. Assim, o método correcto de reconstrução depende da aplicação e para cada aplicação, é necessário usar o algoritmo (programa) correcto.

A reconstrução de uma superfície é um processo complexo. Os pontos medidos estão normalmente desorganizados e a superfície pode ser arbitrária, com uma topologia desconhecida e com características mal definidas ou erróneas.

Assim o método reconstutivo tem de inferir a geometria, topologia e características correctas, a partir de um conjunto finito de pontos.

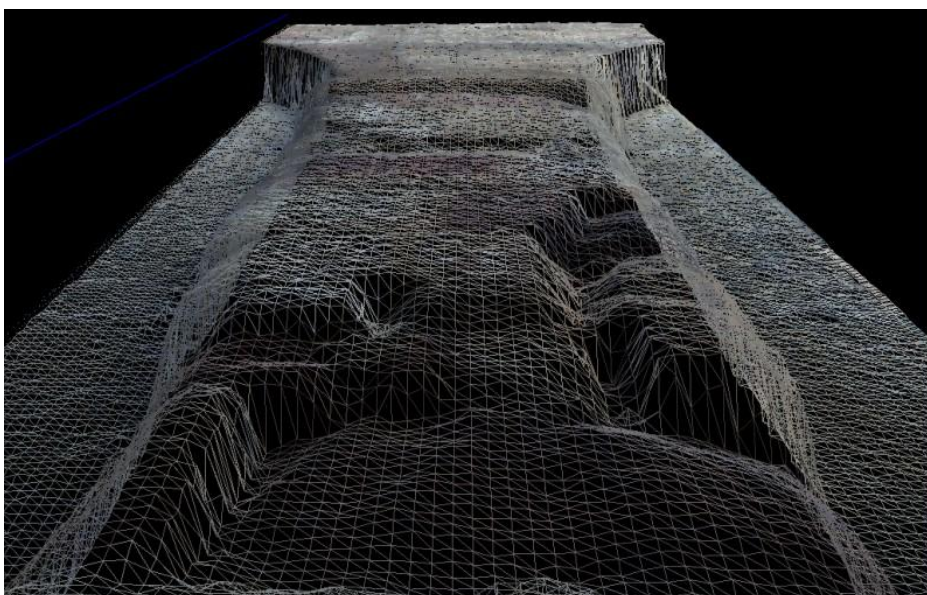


Fig. 26 – Malha poligonal gerada a partir de nuvem de pontos

3.5.1. Classificação da reconstrução algorítmica

Classificar todos os métodos de reconstrução algorítmica é bastante complicado visto ser um *universo* algo vasto.

Seguem-se alguns exemplos generalizados de classificação, de acordo com a qualidade (tipo) de dados:

- **Nuvem de pontos não organizada** – os algoritmos que analisam dados não organizados não têm mais nenhum tipo de informação, a não ser a sua posição espacial. Não podem atribuir nenhuma relação à geometria do objecto e assim, antes de gerarem uma superfície poligonal, normalmente estruturam os pontos de acordo com a sua coerência. Precisam de uma boa distribuição de atribuição de dados e se os pontos não estão distribuídos de maneira uniforme, facilmente erram o cálculo.
- **Nuvem de pontos estruturada (organizada)** – este tipo de algoritmos tem em conta informação adicional dos pontos, por ex. linhas ou segmentos.

Uma distinção mais aprofundada pode ser feita de acordo com a sua subdivisão espacial:

- **Algoritmos de superfície orientada** – não distinguem se a superfície está aberta ou fechada. A maioria dos algoritmos pertence a este grupo.
- **Aproximação volumétrica** – estão relacionados com superfícies fechadas (*closed surfaces**) e geralmente são baseadas na *tetraedrização de Delaunay** num dado conjunto de pontos.

Outra classificação é baseada no tipo de representação da superfície:

- **Representação paramétrica*** – este método representa a superfície como um número de fragmentos paramétricos da superfície, onde esta é definida por equações paramétricas. Vários fragmentos paramétricos podem então ser unidos, de maneira a formar uma superfície contínua.

Ex. – *B-Spline**, *curvas de Bezier**, *fragmentos Coon**

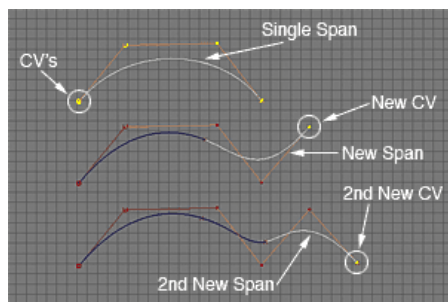


Fig. 27 – Exemplo de elementos de curvas paramétricas com os respectivos pontos de controlo

- **Representação Implícita** – este método tenta encontrar uma função de suavização que passe por todas as posições onde a função implícita avalia um valor especificado (normalmente zero).
- **Representação Simplicial*** – nesta representação a superfície é um conjunto de entidades simples incluindo pontos, arestas e triângulos. Este grupo inclui *formas Alpha** e *Algoritmos de Crusts**.

Superfícies aproximadas ou interpoladas podem ser geradas sempre de acordo com as seguintes maneiras de representação:

- **Superfícies Aproximadas** – nem sempre contêm todos os pontos originais, mas pontos o mais próximo possível deles. Podem usar a função de distância (a distância mais curta entre uma superfície e um ponto no espaço a partir da superfície gerada) para estimar a *malha (mesh*)* correcta.
- **Superfícies Interpoladas** – são usadas quando se pretendem modelos precisos. Todos os dados inseridos são usados e é necessária uma afinidade correcta entre eles.

Finalmente podemos classificar os métodos de reconstrução de acordo com os diferentes pressupostos do algoritmo:

- **Algoritmos assumindo um tipo de topologia fixa** – normalmente assumem que a topologia da superfície é conhecida *a priori* (ex. plano, cilindro ou esfera).
- **Algoritmos que exploram estrutura ou informação de orientação** – no caso de varrimento múltiplo, podem usar relação de adjacência dos dados, dentro do alcance da imagem. Por outro lado, outros métodos usam a informação da orientação da superfície, fornecida com os dados. Ex. se os pontos são obtidos a partir de dados volumétricos, o gradiente destes dados pode fornecer informação de orientação, útil à reconstrução.



Fig. 28 – Exemplo de varrimento múltiplo de uma cabeça humana, em que os pontos comuns são ajustados de maneira a obter-se coerência da forma final

3.6. Conversão dos pontos em superfícies

A conversão dos dados obtidos numa superfície poligonal é geralmente dividida em quatro passos:

1. **Pré-processamento** – nesta fase os dados errados são eliminados ou os pontos são simplificados, de maneira a reduzir o tempo de cálculo computacional.
2. **Determinação da topologia global das superfícies do objecto** – aqui as relações de vizinhança entre partes adjacentes têm de ser obtidas. Esta operação necessita normalmente de um passo para ordenar globalmente a informação e considerar possíveis restrições (ex. quebras de linhas), principalmente para preservar características específicas (ex. arestas).
3. **Criação da superfície poligonal** – são criadas malhas triangulares de maneira a satisfazer uma certa qualidade de requerimentos (ex. limite do tamanho da malha, ausência de intersecções ou quebras de linhas, etc.)
4. **Pós-processamento** – depois de o modelo ser criado, são normalmente aplicadas operações de edição de maneira a refinar e tratar a face poligonal.



Fig. 29 – Malha gerada por nuvens de pontos do interior de um edifício

Fig. 30 – A mesma malha depois de tratada e texturada

3.6.1 Pré-processamento

As operações de edição nos pontos medidos são muito importantes antes de gerar uma face triangulada.

As operações de pré-processamento são normalmente as que se seguem:

1. Amostragem de dados, baseada na curvatura dos pontos ou uniformemente aplicada. No caso dos dados do scanner, este passo é mandatário de modo a reduzir a redundância da informação dos dados entrados (*downsampling* – redução da amostragem) e outros erros devido às limitações do dispositivo de varrimento laser.
2. Redução de incoerências e rejeição de partes isoladas (*outliners*) – métodos estatísticos são aplicados, tendo em consideração a curvatura da superfície tentando preservar as características medidas. No caso de resultados de correspondência de imagem, as correspondências erradas podem ser removidas automaticamente ou visualmente através de inspeção visual.
3. Fecho de cavidades ou buracos – as aberturas nas nuvens de pontos são fechadas adicionando (manualmente ou automaticamente) novos pontos e usando a curvatura e densidade dos pontos vizinhos.

3.6.2 Triangulação ou Geração de Malhas (meshes)

Pode-se considerar esta fase como a parte principal de quase todas as fases da reconstrução. Uma triangulação converte um dado conjunto de pontos num modelo poligonal consistente (mesh). Esta operação divide os dados carregados em *simplices* e normalmente gera vértices, arestas e faces (representando a superfície analisada) que se encontram apenas em arestas partilhadas. Métodos de elementos finitos são usados para discernir o domínio medido, dividindo-o em pequenos elementos variados, normalmente triângulos ou quadriláteros em duas dimensões e tetraedros em três dimensões. Uma ótima triangulação é definida medindo ângulos, comprimento de arestas, altura ou área dos elementos, enquanto o erro por aproximações de elemento finito é normalmente relacionado ao mínimo ângulo dos elementos. Os vértices da triangulação podem ser exactamente os pontos principais ou pontos extra, chamados pontos *Steiner*, que são inseridos de maneira a criar uma malha mais otimizada.

A triangulação pode ser executada em 2D ou 3D, de acordo com a geometria dos dados carregados.

3.6.2.1. Triangulação 2D

O domínio dos dados de entrada é uma região poligonal do plano e, como resultado, são criados triângulos que se intersectam em arestas comuns e os vértices são gerados. Um tipo de construção conhecida é a Triangulação *Delaunay* (TD) que simultaneamente otimiza várias medidas mencionadas previamente.

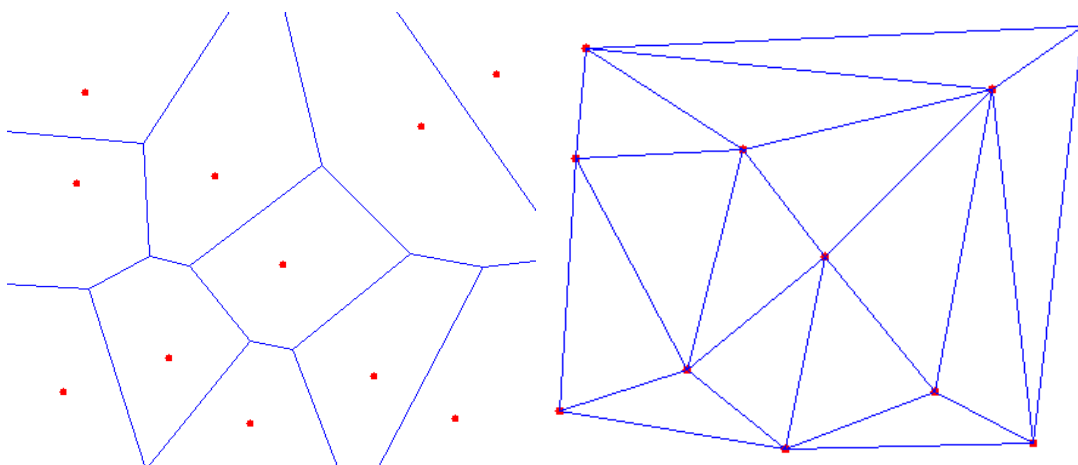


Fig. 31 – Diagrama de *Voronoi* – cada região é formada por segmentos relativos ao número de pontos, ou nós, na vizinhança do ponto considerado. Assim, um nó com 5 pontos na vizinhança está contido numa região com 5 lados.
Fig. 32 – Triangulação *Delaunay* (direita) Conectando os nós das células de *Voronoi* que têm regiões comuns, formam-se os triângulos *Delaunay*.

O critério de *Delaunay* assegura que não hajam vértices que ‘caiam’ no interior de nenhuma das circunferências dos triângulos que formam a rede. A TD de um dado conjunto de pontos é o ‘duplo’ do Diagrama de *Voronoi* (também chamado de *Thiessen* ou *Dirichlet tessellation* – tesselação), como mostram as figuras acima.

3.6.2.2. Triangulação 2.5D

O conjunto de dados inseridos é um conjunto de pontos P num plano, juntamente com uma única e real função de elevação $f(x,y)$ em cada ponto $(x,y) \in P$.

Uma triangulação 2.5D cria uma função linear F que interpola P e é definida na região delimitada pelo invólucro (*hull*) convexo de P .

Para cada ponto p em P , $F(p)$ é a ponderação média, ou majoração da elevação dos vértices do triângulo que contém p .

Normalmente a TD é usada como função de interpolação. De acordo com a estrutura dos dados, regular ou aleatoriamente distribuída, a superfície gerada é chamada de grelha de elevação (*elevation grid*) ou ‘modelo TIN’ (rede irregular triangulada – *Triangulated Irregular Network*).

3.6.2.3. Superfícies para modelos 3D

Os dados inseridos são sempre um conjunto de pontos P em R^3 , mas não mais restritos a um plano; assim a função de elevação $f(x,y)$ já não é única. O conjunto de dados é chamado também de nuvem de pontos desorganizados.

3.6.3 Triangulação 3D

A triangulação em 3D é chamada de *tetraedralização* ou *tetraedrização*.

A tetraedrização é uma partilha do domínio de dados em que se obtém um conjunto de tetraedros que apenas partilham faces (vértices, arestas ou triângulos). Os resultados da tetraedrização são mais complicados que a triangulação 2D. Os tipos de dados inseridos podem ser poliedros simples (esfera), poliedros não-simples (*torus - donut*) ou nuvens de pontos.

3.6.4 Operações de Pós-processamento

Os polígonos criados necessitam de refinamento ou tratamento final, de maneira a corrigir imperfeições ou erros na superfície. Estas operações (normalmente manuais) variam entre a simples edição de triângulos até à correcção de superfícies:

1. **Correcção de arestas** – as faces podem ser separadas (divididas em duas partes), movidas para outro local, encurtadas, ajustadas.
2. **Inserção de triângulos** – cavidades podem ser fechadas ou preenchidas, construindo estruturas poligonais que respeitem a área circundante; malhas incompletas também podem ser reparadas através da função baseada em radiais, ou por aproximação volumétrica.
3. **Edição de polígonos** – o número de polígonos pode ser reduzido preservando a forma do objecto, ou ajustando os pontos de fronteira (outras operações automáticas podem ser utilizadas em particular para compressão de estruturas poligonais). O modelo poligonal também pode ser melhorado adicionando novos vértices. Além disso, picos ou pontas podem ser removidos através de funções de suavização.

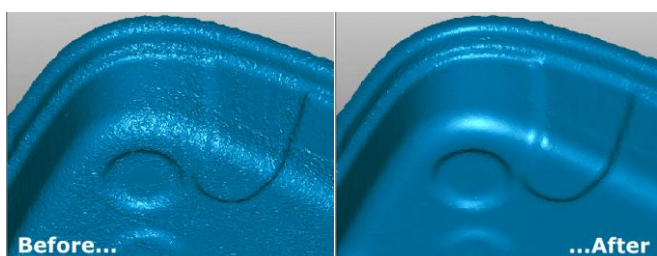


Fig. 33 – Comparação de um modelo 3D antes e depois de tratamento de suavização

3.7 Software de Modelação

o software de modelação são aplicações ou pacotes de aplicações, que executam todas as operações descritas nas secções precedentes. Os polígonos são normalmente a maneira ideal e mais precisa para representação dos resultados calculados, fornecendo uma óptima representação de superfícies.

Assim, com o constante melhoramento das técnicas de medição e cálculo 3D (em particular scanners 3D), ferramentas de produção de superfícies a partir de nuvens de pontos, estão a tornar-se cada vez mais necessárias (software de engenharia reversa – *reverse engineering*) para uma representação mais precisa e fiel de dados 3D, organizados ou não organizados.

Paraforms	3D Reshaper	Geomagic	Cyclone
Farfield	Imageware Surfacar	Polyworks	Solidworks
Rapidform	Spatial Analyzer	AutoCAD	Microstation

Tabela: software de 'engenharia reversa' e CAD, para operações de modelação.

Existem também pacotes de programas para modelação e *render** (renderização) – software de animação por computador – principalmente baseados em *Spline*, que incluem ferramentas para modelação 3D (desde modelos primitivos como cubos, esferas, cones, etc.), controlo de luz e mapeamento de texturas. Este software é bastante popular especialmente na comunidade do grafismo.

Normalmente não permitem a importação de nuvens de pontos em 3D e o seu objectivo principal é normalmente a animação do modelo criado.

Softimage 3D	Poser	Extreme 3D	3D Shockwave
Easymodel	Amira	Cinema 4D	Animation Master
Rhinoceros	AC3D	I-Sculpt	Corel Dream 3D
3D Studio Max	Maya	Lightwave	Model Magic 3D
Vue	Bryce	RenderMan	World Builder

Tabela: alguns pacotes de animação por computador

3.8 Visualização

Em várias aplicações que possuem busca de visualização de partículas, nevoeiro, nuvens ou água, e com uma grande quantidade de pontos, os dados podem ser visualizados simplesmente desenhando todas as amostras. No entanto, para alguns objectos (e nuvens de pontos pouco densas) esta técnica não traz grandes resultados e não permite uma visualização realista. Além disso a visualização de um modelo 3D é muitas vezes o único produto de interesse para o mundo exterior. Assim permanece desta maneira como o único contacto com o modelo e requerer-se-á então uma visualização mais realista e precisa.

Na comunidade da fotogrametria, as primeiras tentativas de visualização de modelos 3D foram feitas no início dos anos 90. Pequenos objectos (ex. modelos arquitectónicos, veículos, faces humanas) eram apresentados em formato *wireframe* (modo *alâmbrico* – ‘arame’), ou usando pacotes CAD, enquanto modelos de terreno eram visualizados e perspectiva também *wireframe* com sobreposição de orto-fotos ou orto-fotomapas.

Hoje em dia com a evolução do hardware para computadores (memórias, processadores, processadores gráficos dedicados), sombreado e textura são adicionados a todos os modelos, mas de maneira a visualizar grandes conjuntos de dados correctamente, muita informação contida em modelos fotogramétricos é reduzida frequentemente. As consequências são a perda de dados precisos, tal como a perda de geo-referenciação (a maioria do software tem o seu próprio sistema de coordenadas) e texturas de alta resolução são inutilizáveis (devido ao controlo do nível de detalhe – *Level of Detail, LoD*). Por outro lado, a visualização pouco precisa ou pouco realista não atrai o utilizador final e não justifica o alto custo da produção fotogramétrica de modelos 3D.



Fig. 34 – Ambiente 3D com tratamento fotorrealista – texturas de alta resolução, efeitos realistas de luz, sombra, reflexo

Fig. 35 – Ambiente 3D com tratamento fotorrealista (exterior)

3.8.1. Modos de apresentar modelos 3D

Após a criação de uma malha triangular (mesh), os resultados são normalmente visualizados, de acordo com o pacote e com os requisitos, da seguinte maneira:

- **Modo *wireframe*** – é a maneira mais simples de representação de um objecto 3D. Consiste em pontos, linhas e curvas, e representa apenas as arestas num desenho transparente sem informação de sombra ou textura. Este modo é normalmente usado em pacotes CAD.
- **Modo *Shaded* (sombreamento)** – é baseado na teoria da óptica de *Lambert* (*Lambert's Cosine Law*) que refere que o brilho de qualquer área (polígono) de uma superfície perfeita, difusa e ondulada, é resultante do co-seno do ângulo de luz de incidência paralela.

Existem diferentes tipos de algoritmos de sombreamento (*shade*), sendo os mais conhecidos, o *flat shading* (sombreamento simples ou constante) e o *smooth shading* (sombreamento suavizado). A diferença principal nestes dois tipos de sombreamento está na maneira em que as *normais** são usadas. O *flat shading* atribui um vector normal e simples a cada triângulo. A luz é criada individualmente em cada face. No *smooth shading*, as normais da superfície são majoradas e a cada vértice é atribuída uma normal.

O *flat shading* é válido para objectos pequenos, e se a fonte de luz e o observador estão muito afastados; para níveis muito detalhados, é necessário um grande número de polígonos em *flat shade*, portanto têm um baixo valor de realismo.

O *smooth shading* pode ser aplicado com vários algoritmos, mas as duas maneiras mais clássicas de aplicação são o *Gouraud* e o *Phong*.

O sombreamento *Gouraud* especifica uma cor para cada vértice e polígono. Depois majora cores geradas ao longo de cada aresta, por interpolação entre vértices.

O sombreamento *Phong* requer uma interpolação normal para cada *pixel** e assim é algo proibitivo, pois leva mais tempo a ser gerado para ser usado em tempo real.

- **Modo texturado** – é usado para visualização fotorrealista de modelos 3D (render baseado em imagem). O mapeamento de textura na sua forma mais simples, envolve uma textura única (imagem, ortofoto) mapeada numa superfície composta por um ou mais polígonos. Quando se mapeia uma imagem a um objecto, a cor do objecto em cada pixel é modificada pela cor correspondente, derivada da textura.

Comparado com o sombreado, o mapeamento de textura pode reduzir o número de polígonos usados, mas sobrecarrega o modelo em termos de visualização. É necessário uma grande quantidade de memória *RAM** para um render realístico de um modelo 3D texturizado – assim um novo interface gráfico foi desenvolvido: o *AGP (Accelerated Graphics Port)*. O *AGP* permite que a textura seja armazenada na memória principal do computador, mais eficaz que a memória vídeo, aumentando a velocidade de transferência de grandes texturas entre a memória, *CPU** e adaptador vídeo. Actualmente esta tecnologia já se encontra ultrapassada pelo novo interface *PCI-Express**, comum em qualquer computador.

No caso de modelos 3D (DTM) outros métodos de representação são os mapas de contorno, os modelos sombreados a cor (sombreamento hipsométrico) ou mapas de declive. Num mapa de contorno, as linhas são geradas e apresentadas a partir dos modelos de terreno através da intersecção horizontal de planos com a rede. Num modelo de sombreado a cor, a informação de altura ou elevação é apresentado com cores.

Em geral, a criação de modelos 3D realistas; sombreados ou texturizados) ajudam a visualizar o resultado final do que uma representação *wireframe*. No modelo *wireframe*, como não existe a possibilidade de remoção de superfícies ocultas, nem sempre é fácil distinguir qual o ponto-de-observador (POV) em relação ao objecto.

O sombreado e a renderização melhoram bastante o realismo do modelo. Para decidir qual o tipo de modelo a produzir, há que considerar diferentes factores, como o tempo, o hardware disponível e as necessidades de visualização. Se o tempo é limitado, ou o hardware não é suficiente para suportar grandes ficheiros, os modelos de sombreado podem não ser necessários. Por outro lado, apresentações comerciais ou voos virtuais, requerem modelos texturizados.

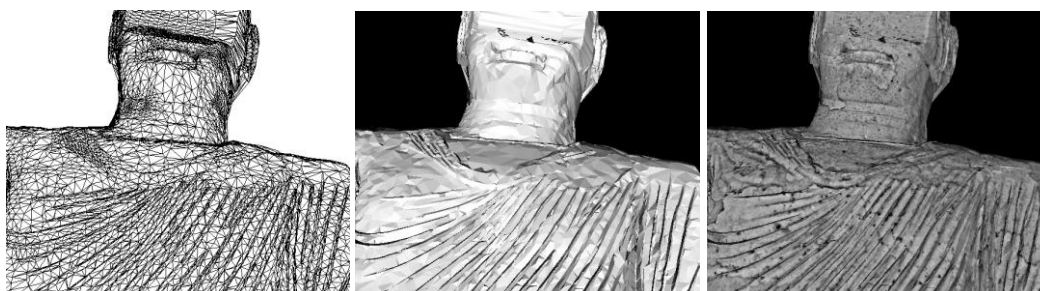


Fig. 36 – Vista de um modelo 3D do *Buda Bamiyan*, representado em *wireframe*, *flat shaded* e *modo texturado*.

3.8.2. Pacotes de visualização e formatos de ficheiros 3D

As ferramentas e programas de visualização estão disponíveis em diferentes formas, gratuitos e comerciais, para grandes modelos ou pequenos conjuntos de dados. Alguns pacotes têm a possibilidade de inserção de documentos de texto, hiperligações, sons e vídeos. Alguns programas são programados apenas para apresentar cenas em 3D com poucas funções de edição (visualizadores *VRML**, *Skyline*, etc.).

Por outro lado, programas de animação permitem sempre funções de visualização e animação, mas não suportam muitos formatos 3D.

Até há alguns anos atrás, eram principalmente utilizados pacotes CAD para gerar volumetrias de modelos 3D e visualizá-los em *wireframe* ou em modo texturizado. Hoje em dia estes programas podem também executar *renders* de modelos reais de uma maneira quase tão precisa quanto os pacotes gráficos, como por ex. o *3D Studio Max* ou *Maya*.

AutoCAD	Archinfo	Virtual GIS
Skyline	Cyberwalk	Macromedia Editor
TerraVista	ArcView	Idrisi
VirtuoZo	TerrainView	SolidWorks
Vrware	Scene Viewer	Cosmo Player
Inventor	Vis5D+	GeomView

Tabela: alguns pacotes de visualização. Os pacotes de software nas células a sombreado estão disponíveis gratuitamente na *internet*. Existem outras soluções comerciais para visualização de terreno.

De acordo com o tipo de modelo (terreno ou objecto) e a visualização pretendida (animação, voo, posição estática), diferentes pacotes de *software* podem ser usados. Alguns são específicos e usados apenas com modelos particulares, outros podem ler formatos 3D diferentes.

Ao princípio é difícil seleccionar qual o software adequado, já que são necessários diferentes testes e trabalho prático nos vários conjuntos de dados.

O software de visualização pode ser classificado usando critérios de qualidade ou parâmetros como a interactividade, o *antialiasing**, o nível de detalhe (LOD). Um software comum divide os pacotes de opções de acordo com a configuração do hardware e o seu performance em tempo real:

- Ferramentas de alta qualidade – são pacotes comerciais que permitem todo o tipo de visualizações e animações necessárias, mesmo em computadores portáteis (*laptops*) – ex. *Skyline*.
- Qualidade média – conseguem renderizar grandes modelos mas têm um fraco despenho em tempo real (ex. *Virtual GIS*).
- Baixa qualidade – normalmente estão disponíveis na internet e permitem apenas apresentar pequenos conjuntos de dados em tempo real. (ex. *Cosmo Player*)



Fig. 37 *Microstation* – Resultado de *render* com *ray tracing**



Fig. 38 – Resultado em *3D Studio Max*.

Uma grande dificuldade actualmente é a interpretação e intercâmbio de dados 3D entre os pacotes de modelação/visualização. Cada software (de modelação) tem sempre o seu formato (binário). Mesmo que permitam exportar os ficheiros para outros formatos, o ficheiro 3D gerado muitas vezes não pode ser importado noutros pacotes.

Normalmente o único formato de exportação praticável de um pacote CAD é o DXF, que não contém textura, requer grande espaço de armazenamento e muitas vezes produz erros consideráveis. Existem contudo alguns conversores gráficos de formatos 3D (*PolyTrans*, *3DWin*), mas é necessária a normalização ou estandardização dos vários formatos 3D de maneira a facilitar o intercâmbio de modelos.

Processos de standardização foram já feitos como o formato *VRML* (*Virtual Reality Modeling Language* – *AVI* ou *MPEG* para o vídeo), permitindo um intercâmbio fácil de modelos 3D, por ex. na internet.

Um eficiente e completo pacote de visualização deve fornecer a possibilidade de importar, apresentar e exportar formatos 3D, tal como dados de textura de imagem. Esta flexibilização é normalmente por pacotes desenvolvidos academicamente por algumas universidades.

3DMax	VRML	Lightwave	Solid Works
OpenFlight	DXF	Inventor	Stereolithography STL
Apple 3DMF	IGES	DirectX	Adobe Illustrator
Cinema 4D	Maya	Shockwave	Wavefront OBJ/MTL

Tabela: formato de ficheiros 3D mais frequentes

3.8.3. Animação e navegação interactiva de modelos 3D

A animação de um modelo 3D pode ser definida como uma sequência de 'frames' capturados, obtidos a partir de um pacote de visualização, que depois se unem. Podem-se animar a câmara de visualização criada, só o modelo 3D (todo o modelo ou parte dele), ou ambos. O modelo é visualizado de vários ângulos e cada vista contribui para a sequência.

A primeira animação foi criada usando software CAD (*AutoCAD, Microstation*) e modelos *wireframe*. De seguida dados de vectores foram também inseridos na textura do objecto e só em meados dos anos 90, com o desenvolvimento de memória de computador, imagens reais foram usadas na produção de modelos 3D animados, fotorrealistas.

Actualmente, de acordo com definições e formatos padrão, vários utilizadores e pacotes de software têm possibilidade de apresentar modelos 3D animados. Os formatos *AVI** e *MPEG** estão a tornar-se bastante populares tal como pacotes gratuitos para estes formatos, dando um grande incentivo a animações e criação de voos virtuais nos modelos. Outro programa padrão para interactividade, mas não para visualização pré-construída de cenários 3D, é a *navegação 3D* (interactiva ou modo de passeio – *walk-through*).

Novas ferramentas estão a surgir todos os dias, por isso é difícil saber de forma concreta qual o panorama destes pacotes no mercado e na internet.

Um problema dos vários pacotes de visualização é o efeito de escadeamento ou distorção (*aliasing*). Aparece durante o *render* e animação de uma cena, porque a frequência espacial da cena é maior que a frequência do monitor (*Nyquist**).

Os pacotes de visualização de terreno nem sempre fornecem funções de *antialiasing* para geometrias e texturas, ao contrário da maioria do software de animação.

3.8.3.1. VRML (Virtual Reality Modeling Language)

É uma das linguagens de navegação 3D interactiva mais comuns, também como formato de ficheiro. O padrão do VRML, também conhecido como VRML 2, é um formato padrão *ISO* para representar modelos 3D (a representação de dados VRML geográficos é conhecida como *GeoVRML*).

A linguagem VRML permite criar cenários 3D em que o utilizador pode navegar usando um *plug-in** no seu *browser** de internet, como o *Cosmo Player* (*browsers da Web*), *Vrweb* ou *Vrware* (para Sun/SGI/Linux*), *Terraform*, *SolidView* ou *WorldView* (para PC *Windows*).

O VRML dá-nos também a possibilidade de armazenar algumas posições definidas de vários pontos de vista, permitindo voos automáticos através do modelo 3D.

3.8.3.2. Open Graphics Library (OpenGL)

O *OpenGL* é principalmente um programa interface (API*) para *hardware* gráfico. As bibliotecas consistem em vários procedimentos e funções de maneira a criar e representar facilmente objectos 2D e 3D, controlando o render através da aceleração de hardware. O *OpenGL* foi desenvolvido pela *Silicon Graphics** (*Cosmo Open GL*) e *Microsoft* (*Microsoft Open GL*). É chamado em linguagem corrente de programa *open-source*, ou seja, pode ser usado e melhorado pelos vários utilizadores. Este API permite animação interactiva e funções de *antialiasing* mas não transporta modelos 3D, ou seja, executa apenas melhoramento gráfico em modelos já criados por outros pacotes de software. Contudo pode ser combinado com linguagens de programação, tais como *C*, *Fortran* ou *Delphi*.

3.8.3.3. Skyline

O Skiline é um pacote completo, que não requer programação e permite todo o tipo de animação e visualização necessárias. É também uma ferramenta de alta qualidade para visualização de terreno, permitindo a gestão de grandes conjuntos de dados, texturização de alta resolução e voo em tempo real sobre dados geográficos.

3.9. Compressão de dados geométricos

Novas tecnologias de medição normalmente produzem grandes quantidades de dados, que são posteriormente convertidos em malhas com centenas de milhões de polígonos. Para dados deste tamanho, não é prático utilizar algoritmos comuns de visualização em tempo real e transmissão.

Assim, na última década, uma tendência, em particular na comunidade do grafismo computacional, tem sido o estudo de simplificar a representação destes grandes conjuntos de dados. Os objectivos eram os seguintes:

- Aumentar a velocidade de transmissão ou partilha de grandes modelos geométricos.
- Melhorar o *render* e o desempenho de visualização.
- Reduzir o tamanho de armazenamento e memória sem perda de informação importante.

Normalmente dois tipos de informação são codificados nas malhas criadas: a informação geométrica (ex. posição dos vértices no espaço e normais das superfícies) e informação topológica (ex. a conectividade da malha e relação entre as faces). Baseadas nestes dois tipos de informação e nas necessidades acima descritas foram propostas compressões algorítmicas, principalmente para malhas triangulares.

Estes métodos são baseados nas seguintes operações:

- **Compressão de dados da geometria** – tenta melhorar o armazenamento da informação numérica (posições de vértices, normais, cores, etc.) ou procurar uma codificação eficiente da topologia da malha.
- Controlo do nível de detalhe – *Level-of-Detail (LoD)* – é feito em particular para efeitos de visualização. O *LoD* varia suavemente através da cena ou cenário e o *render* depende da posição corrente do modelo. Controlos no *LoD* permitem melhoramento das malhas dependendo do ponto-de-observador (POV), de maneira a que detalhes não visíveis (faces ou primitivas ocultas) não sejam apresentados. Existe também a possibilidade de controlar texturas usando imagens em pirâmide (ou *MIPmapping**) ou mapeamento de textura dependente mais uma vez do POV.
- Optimização de malhas, filtragem e dizimação – simplificam as malhas removendo vértices, arestas e triângulos. Podem interactivamente remover vértices que não passem uma dada distância ou ângulo, ou reunir arestas num único vértice. Outros processos são baseados em aglomeração de vértices, filtragem de *Wiener** e ondulação.
- Renderização de pontos – é aplicada em particular na visualização de nuvens de pontos e funciona de maneira a apresentar um número reduzido de primitivas.

De entre as soluções propostas, o programa *QSpLat* mostrou bons resultados em termos de desempenho, apresentação em tempo real, compressão e qualidade dos modelos renderizados. Foi criado na Universidade de Stanford, durante o extenso projecto “*The Digital Michelangelo*”^{*} e o objectivo seria construir um software que pudesse ser usado também em computadores de gama baixa, sem recurso a suporte 3D especial.

Isso foi conseguido e o programa encontra-se disponível gratuitamente na Internet demonstrando uma manipulação em tempo real de 100 milhões até 1 bilião de pontos. Outras ferramentas para simplificação de malhas são o *VTK (Visualization Toolkit)*, *Jade*, *PolyReduce*, *Qslim*.

Outras ferramentas comerciais são o *Cosmo Worlds and OpenGL Optimizer for SGI*, *IBM Interaction Accelerator*, *Innovmetrix IMCompress*.

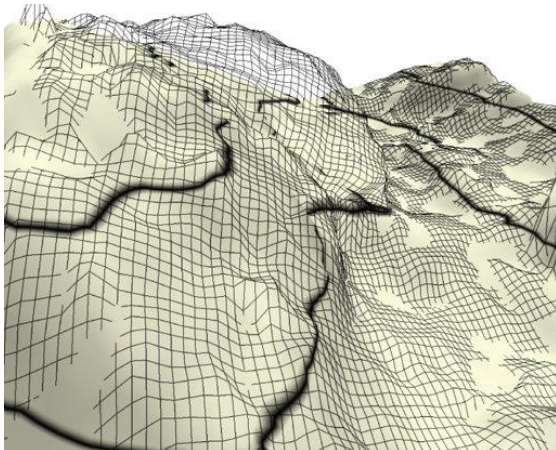


Fig. 39 – Malha ondulada, gerada a partir de conjuntos de superfícies irregulares com quatro vértices.

4. Prototipagem Rápida

A Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping – RP*) é o nome dado a um conjunto de tecnologias usadas na fabricação de objectos físicos a partir de dados CAD. Estes métodos são únicos, visto adicionarem e unirem materiais em camadas, de modo a formar um objecto. Tais sistemas são também conhecidos pelos nomes de Fabricação Aditiva (*additive fabrication*), Impressão tri-dimensional (*three dimensional printing*), Fabricação livre de sólidos (*solid freeform fabrication – SFF*) e fabrico por camadas (*layered manufacturing*).

Hoje em dia as tecnologias de fabricação aditiva oferecem vantagens em várias aplicações, comparando com as tecnologias clássicas de fabricação subtrativa, como por exemplo a fresagem (*milling*):

- Os objectos podem ser formados com qualquer geometria complexa e intrincada, e sem necessidade de se executarem acertos elaborados na máquina para a montagem final.
- Os sistemas de PR reduzem a complexidade da construção de objectos para um processo rápido, simples e maneável.

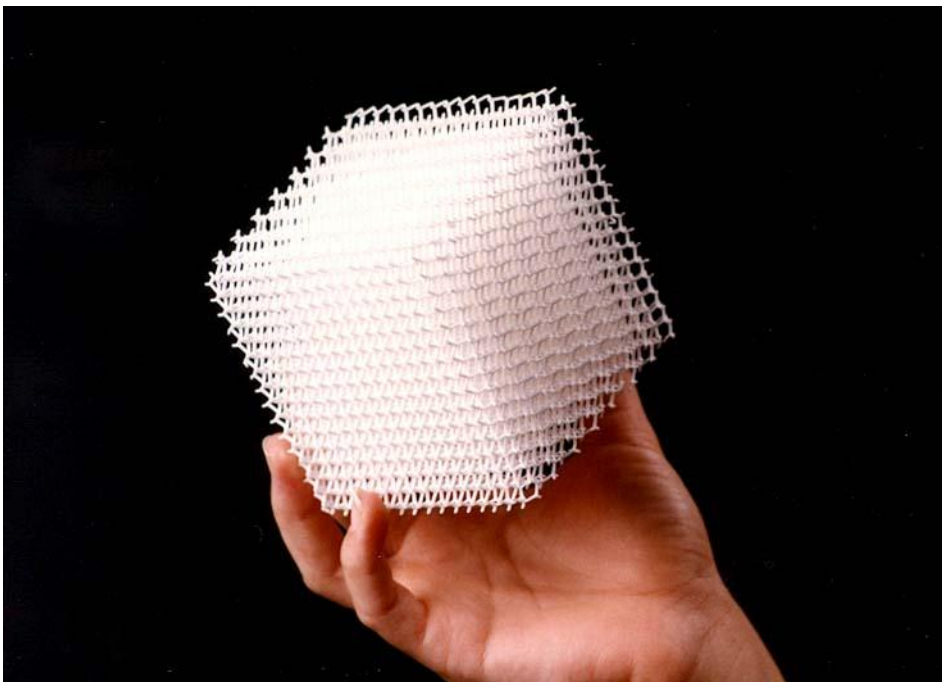


Fig. 40 – Exemplo de complexidade num modelo prototipado

A PR é também referenciada como um veículo ou um meio para visualização. Para além disso, modelos prototipados podem ser usados para teste, como por exemplo uma forma de perfil alar* num túnel de vento. Podem também ser usados para criar modelos que depois de tornam em moldes. Nalguns casos, o processo de PR pode constituir a parte final da criação de um objecto, mas normalmente o material utilizado na fabricação, não é suficientemente forte ou preciso. Quando o material usado na PR é adequado, podem ser produzidas formas muito complexas.

Existe uma variedade de metodologias de prototipagem rápida experimental, usadas essencialmente em universidades ou pequenos grupos individuais. Comercialmente as técnicas de PR mais utilizadas são a ***Stereolithography (SLA)***, ***Selective Laser Sintering (SLS)***, ***Laminated Object Manufacturing (LOM)***, ***Fused Deposition Modeling (FDM)***, ***Solid Ground Curing (SGC)*** e técnicas de ***Inkjet printing (impressão a jacto de tinta)***.



Fig. 41 – À esquerda, modelo prototipado. À direita, modelo da peça final.

4.1. Vantagens da Prototipagem Rápida

- Aumento eficiente de comunicação/partilha do processo de projecto
- Diminuição do tempo de produção
- Diminuição de erros de produção, diminuindo assim os custos
- Minimizar mudanças constantes no processo de produção ou manutenção
- Alargar o tempo de vida do produto, adicionando características necessárias e eliminando as que são redundantes ou desnecessárias, durante a fase inicial de projecto
- Aumento do número de variantes do produto
- Aumento da complexidade do produto
- Decréscimo do tempo de vida do produto antes da obsolescência
- Decréscimo do tempo de entrega, apresentação/comercialização

A metodologia geral para as várias técnicas de PR pode ser abreviada da seguinte maneira:

1. Um modelo CAD é criado, sendo depois convertido em formato *.STL* (*stereolithography*). A resolução do modelo pode ser manipulada para minimizar o movimento da base na máquina, onde vai ser criado o modelo.
2. A máquina processa o ficheiro *.STL* criando várias camadas do modelo.
3. A primeira camada do modelo físico é criada. O modelo vai sendo baixado através da base e de acordo com a espessura da camada seguinte. O processo repete-se até o modelo estar completo.
4. Os suportes e o modelo são depois removidos. Por fim as superfícies do modelo são finalizadas e limpas.

4.2. CNC (*Computer Numeric Control*) ou Prototipagem Rápida?

A PR não é a solução para todos os problemas na fabricação. A tecnologia CNC está consolidada há bastante tempo na indústria, é vastamente compreendida e disponível, oferece uma ampla gama de materiais e uma excelente precisão na fabricação/finalização das peças. Contudo, se os requisitos envolvem a produção de um objecto ou parte de um objecto com uma moderada complexidade geométrica e de uma maneira rápida, então a PR tem a vantagem. Neste aspecto é fácil tomar a decisão da tecnologia que se vai empregar, CNC ou PR. Para outros casos, não tão complexos, a decisão torna-se um pouco mais indeterminada, dependendo de um número de variáveis e condicionantes. Portanto, é um compromisso com que o produtor terá de se deparar. Enquanto a precisão da PR não é normalmente tão boa como a do CNC, é hoje adequada e aplicada a uma vasta gama de aplicações exactas.

4.3. Stereolithography – SLA (estereolitografia)

A Estereolitografia (*SLA – stereolithography apparatus*) é a técnica de PR mais utilizada. Esta técnica cria objectos através de camadas à vez, traçando um raio laser na superfície de uma tina contendo líquido fotopolímero*. Esta classe de materiais, normalmente criada para impressão e indústria de embalagem/acondicionamento, solidifica rapidamente assim que um raio laser atinja a superfície do líquido.

Quando a primeira camada está desenhada ou traçada, esta é baixada numa pequena distância dentro da tina, e a segunda camada é aplicada. A propriedade adesiva do material faz com que as camadas se unam. Após a adição de todas as camadas necessárias, é criado então um objecto tridimensional.

Alguns objectos podem apresentar ressaltos ou picos que têm de ser apoiados durante o processo de fabricação por uma estrutura. Estes ressaltos são desenhados e fabricados, manualmente ou automaticamente, em conjunto com o objecto. Após a conclusão da fabricação, o objecto é retirado da tina e os apoios ou suportes são cortados.

A *SLA* é normalmente considerada a tecnologia que apresenta maior precisão e acabamento das superfícies, entre as várias técnicas de PR.

Ao longo dos anos, tem sido desenvolvida uma vasta gama de materiais com propriedades semelhantes aos termoplásticos de engenharia. Materiais com mudança de cor limitada selectivamente têm vindo a ser desenvolvidos e disponibilizados para ciências biomédicas. Materiais cerâmicos estão também actualmente a ser desenvolvidos.

Esta tecnologia é também aplicada a objectos de grandes dimensões, na medida do possível.

A parte negativa da *SLA* é o facto de, ao se trabalhar com materiais líquidos, poder haver mais sujidade. Por vezes os objectos requerem uma operação de pós-cura num forno especial, para uma cura completa e estabilidade.

Recentemente, a tecnologia de *inkjet* (jacto-de-tinta) tem sido alargada às operações com fotopolímeros, resultando em sistemas com rápida operação e boa precisão.

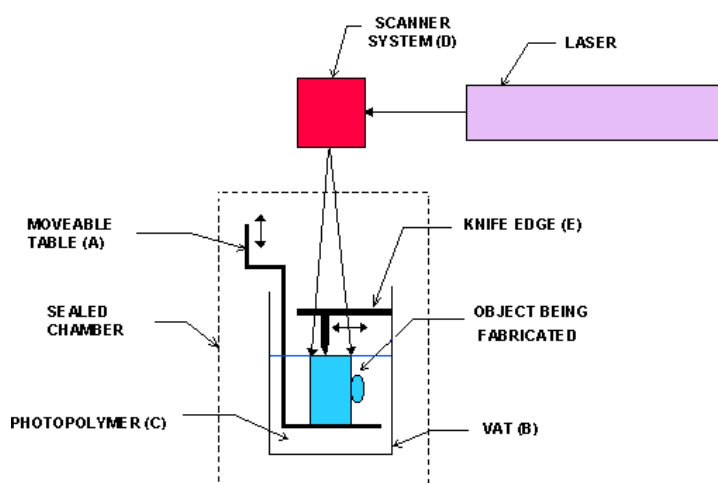


Fig. 42 – Processo esquemático da estereolitografia

Processo gráfico da SLA

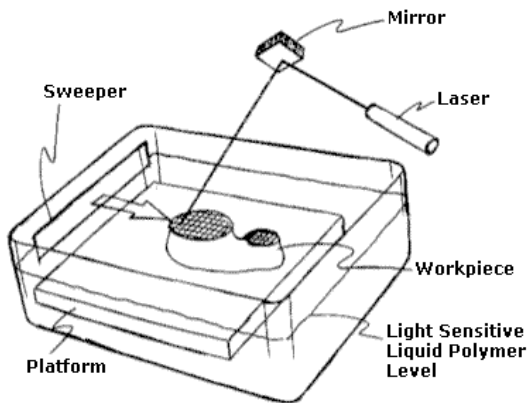


Fig. 43 – Esquemas desenhados: vista geral do aparato

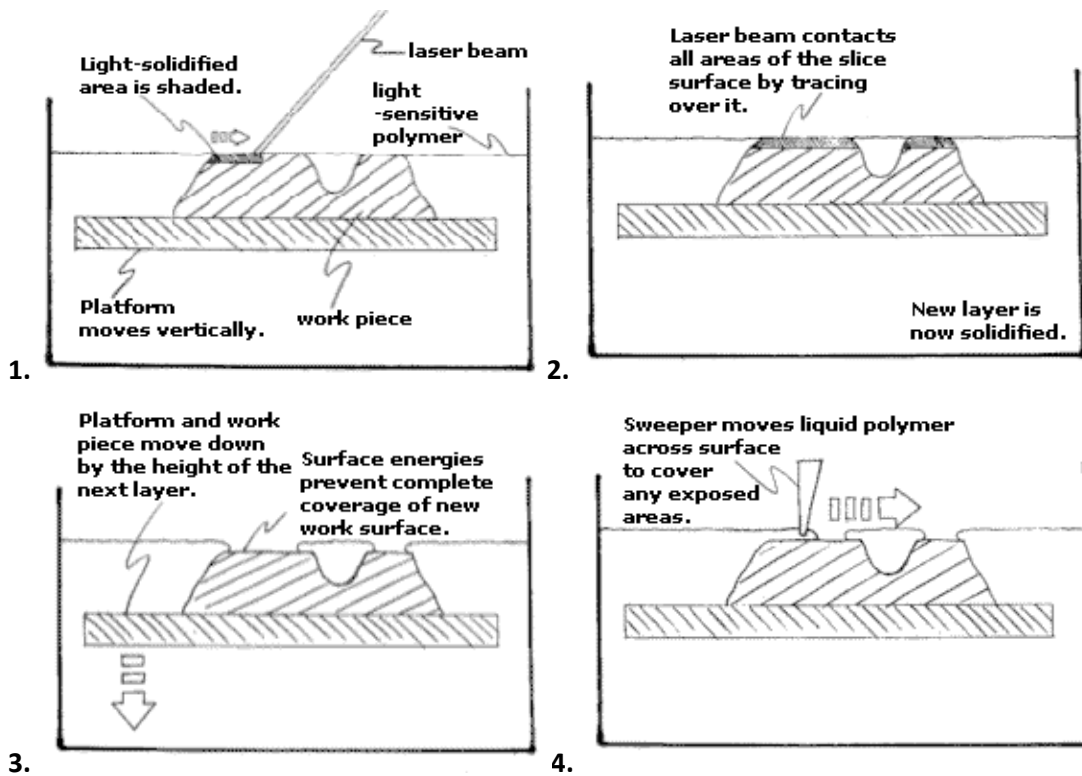


Fig. 44 – Esquemas desenhados: os 4 passos para a criação de uma camada do objecto

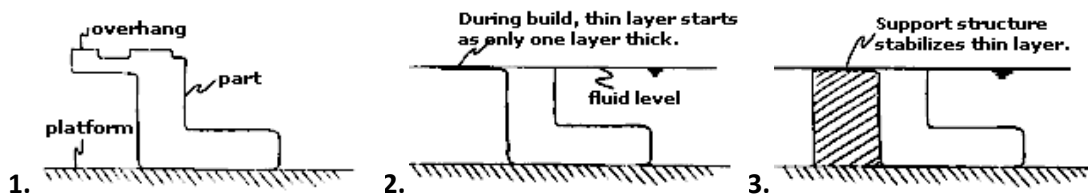


Fig. 45 – Esquemas desenhados: quando existem partes salientes no objecto, são necessários suportes até que as primeiras camadas da saliência endureçam



COMPLETED PART Fig. 46 – Peça completa

4.4. Laminated Object Manufacturing – LOM (fabricação de objectos laminados)

Neste processo os perfis das secções do objecto são traçados com laser, a partir de papel ou outro material em forma de tecido. O papel é desenrolado a partir de um cilindro. É primeiro empilhado e unido à camada precedente usando um rolo aquecido que derrete um revestimento de plástico na base do papel. Os perfis são então desenhados e cortados através de um sistema óptico montado numa plataforma móvel de eixos X-Y.

Depois do corte da camada estar completa, o excesso é removido para separar a camada da malha traçada no papel. O papel desperdiçado é reaproveitado a partir de um rolo de admissão.

O método lida de uma forma sustentada com ressaltos ou rebaixamentos. As áreas de secção transversal que têm de ser removidas no objecto final, são marcadas pelo laser para facilitar a remoção.

No geral, o acabamento, precisão e estabilidade dos objectos em papel não tem tanta qualidade comparando com outros métodos de PR que utilizam materiais diferentes. Contudo, o custo do material é baixo e os objectos têm aparência física e visual da madeira, o que permite trabalhá-los e dar-lhes acabamento da mesma maneira. Isto tem contribuído para certas aplicações, tais como padrões para moldes de areia.

Apesar de haver limitações a nível de material, já foram executados trabalhos com plásticos, materiais compósitos, cerâmicos e metais.

4.4.1. Processo gráfico da LOM

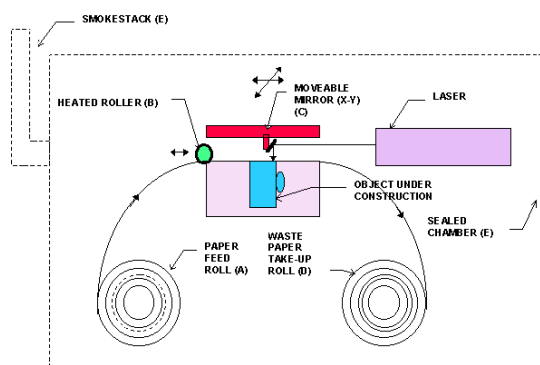


Fig. 47 – Esquema gráfico da LOM

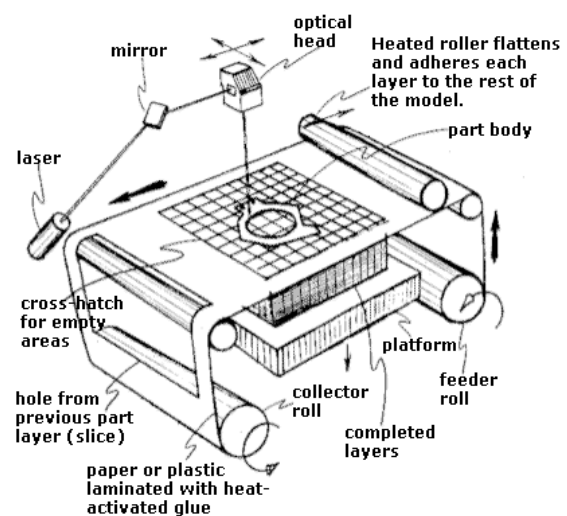


Fig. 48 – Esquema desenhado da LOM

4.5. Fused Deposition Modeling – FDM (modelação por deposição de líquido fundido)

Este é o segundo processo de PR mais utilizado depois da estereolitografia.

Um filamento de plástico com aproximadamente 1/16 pol. (cerca de 1.5 mm) de diâmetro, é desenrolado de uma bobina e fornece material a uma agulha/bocal de extrusão. Algumas configurações da máquina usam pastilhas de plástico alimentadas por um funil em vez de um filamento. A agulha/bocal é aquecida para derreter o plástico e possui um mecanismo que permite controlar o fluxo do líquido. O bocal é fixo a um mecanismo que se move na horizontal e na vertical.

À medida que o bocal se move sobre a plataforma de acordo com a geometria pretendida, deposita uma gota fina do plástico extrudido para formar cada camada. O plástico endurece de imediato depois de ser depositado do bocal e adere à camada inferior.

Todo o sistema mecânico está contido numa câmara/forno que é mantida a uma temperatura um pouco abaixo do ponto de fusão do plástico. Assim, apenas uma pequena quantidade de energia térmica é necessária para derreter o plástico através do bocal. Isto proporciona muito melhor controlo durante o processo.

É necessário criar estruturas ou apoios temporários para qualquer tipo de geometrias com ressaltos ou saliências. Vários materiais estão disponíveis para o processo, incluindo um polímero de nylon e ceras de moldagem.

A introdução de plásticos ABS* proporcionou uma maior aceitação a nível comercial deste método. Permite melhor união entre camadas do que os materiais prévios e consequentemente maior robustez nos objectos fabricados. Materiais solúveis em água também foram introduzidos sendo fácil a sua remoção, apenas com lavagem.

A recente introdução de materiais de policarbonato aumentou ainda mais as capacidades em termos de resistência e âmbito de temperatura. Outros sistemas à base de polímeros, bem como cerâmicos e materiais metálicos, estão também em desenvolvimento.

É um sistema pouco ruidoso, sendo indicado para ter por ex. num *atelier*.

O FDM é um pouco mais rápido no processamento de modelos pequenos ou estreitos. Torna-se mais lento a processar objectos com secções largas. O acabamento dos objectos fabricados através deste método tem vindo a ser melhorado ao longo do tempo, mas ainda não está a par da estereolitografia. O método que compete directamente com o FDM é provavelmente o 3DP – *3D printing* (impressão tridimensional). Contudo, o FDM oferece grande resistência e uma maior gama de materiais, mesmo até que o sistema de impressão 3D da empresa ZCorp®.

4.5.1. Processo gráfico do FDM

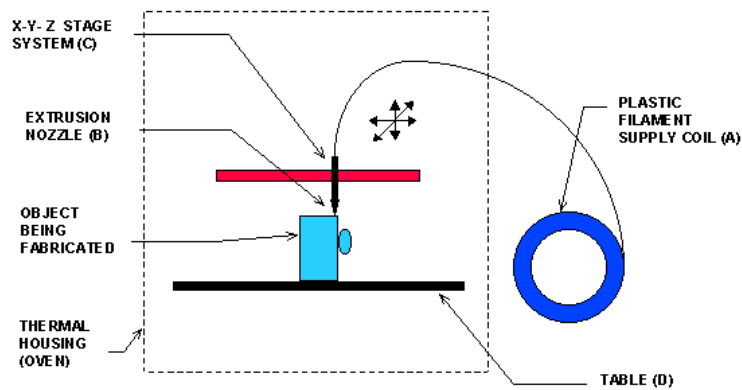


Fig. 49 – Esquema gráfico – no FDM o bocal que fornece o material, move-se nos 3 eixos espaciais

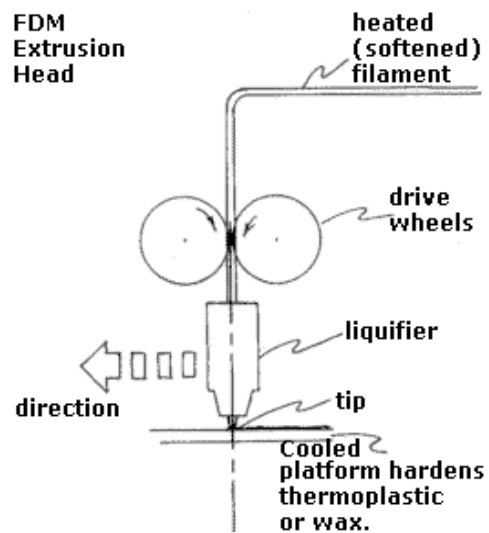


Fig. 50 – Esquema desenhado – a plataforma está a uma temperatura baixa para endurecer o material termoplástico

4.6. Selective Laser Sintering – SLS (Sinterização)

O princípio deste processo é um tanto ou quanto semelhante à estereolitografia. No entanto, neste caso, o raio laser é traçado sobre uma superfície de um pó compactado, feito de um material termoplástico. O pó é espalhado através de um rolo sobre a superfície do cilindro de construção. Um pistão vai movendo para baixo uma camada de espessura do objecto para acomodar a camada de pó.

O sistema que fornece o pó é similar ao sistema de fabrico. É também constituído por um cilindro e por um pistão ou êmbolo. Neste caso o pistão move-se no sentido ascendente para abastecer o pó ao cilindro de fabrico.

O calor do laser derrete o pó, usando um raio concentrado de infra-vermelhos. A câmara de fabricação é selada e mantida a uma temperatura um pouco abaixo do ponto de fusão do pó termoplástico. Assim, o calor emitido pelo raio laser só necessita de aumentar ligeiramente a temperatura para causar sinterização, aumentando substancialmente a velocidade do processo de fabrico.

É necessário manter uma atmosfera de nitrogénio dentro da câmara de maneira a prevenir a possibilidade de explosão quando é necessária uma grande quantidade de pó termoplástico.

Depois do objecto estar totalmente formado, o pistão sobe para o elevar. O excesso de pó é escovado e o processo de acabamento manual é então levado a cabo. O processo, contudo, pode levar algum tempo, pois é necessário que o objecto arrefeça o suficiente para o remover da máquina. Modelos com secções muito pequenas ou estreitas podem necessitar cerca de dois dias para arrefecer.

Não são necessários suportes com este método, já que os ressaltos e filetes são suportados pelo próprio pó compactado, formando uma cama (*powder bed*) de suporte ao objecto que está a ser fabricado. Isto economiza algum tempo em comparação com a estereolitografia. No entanto, as superfícies acabadas não têm tanta qualidade. Não é necessária cura final como na estereolitografia, mas como os objectos são simetrizados, apresentam poros.

Dependendo da aplicação, pode ser necessário infiltrar o objecto com outro material, de maneira a melhorar as características mecânicas.

Muitos desenvolvimentos têm vindo a ser feitos para melhorar os processos de acabamento e porosidade.

O SLS foi prolongado e melhorado, para permitir fabricação directa de objectos metálicos, cerâmicos e ferramentas.

4.6.1. Processo gráfico do SLS

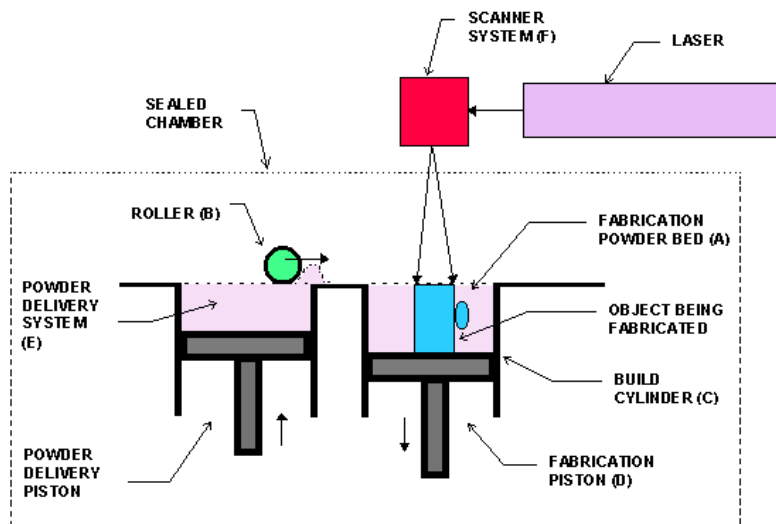


Fig. 51 – Esquema gráfico – o pistão à esquerda fornece o pó termoplástico para o reservatório à direita, onde o modelo está a ser fabricado.

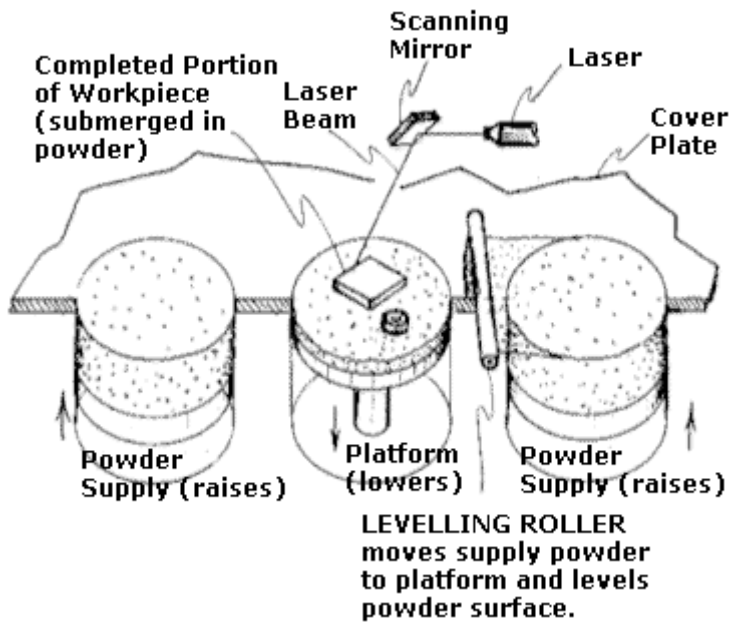


Fig. 52 – Esquema desenhado do mesmo processo

4.7. Three Dimensional Printing – 3DP (impressão tridimensional)

Este sistema foi desenvolvido pelo *M.I.T.** e é similar ao SLS, exceptuando o laser que aqui é substituído por uma cabeça de jacto-de-tinta.

A cabeça de jacto-de-tinta multicanal deposita um composto de líquido adesivo na camada de topo da cama de pó. As partículas de pó vão-se unindo nas áreas onde o adesivo é depositado. Assim que uma camada é completada, o pistão desce a distância de espessura da mesma. Tal como no SLS, o cilindro de abastecimento de pó é similar ao cilindro de fabricação. O pó é fornecido pelo cilindro de abastecimento que vai subindo lentamente, e o rolo espalha-o e comprime-o no topo do cilindro de fabrico. O processo é repetido até que o objecto esteja completo dentro da cama de pó.

4.7.1. Processo gráfico da 3DP

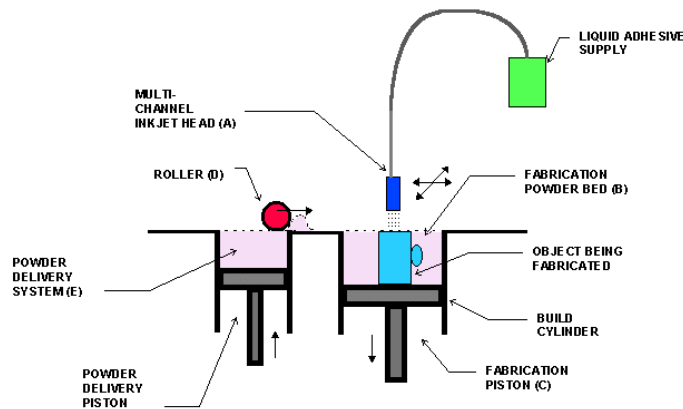


Fig. 7. Three dimensional printing.

Fig. 53 – Processo similar à sinterização, só que aqui em vez do laser, existe uma cabeça com jacto-de-tinta. O jacto de tinta move-se em X e Y, e a plataforma move-se em Z, descendo à medida que cada camada é criada.

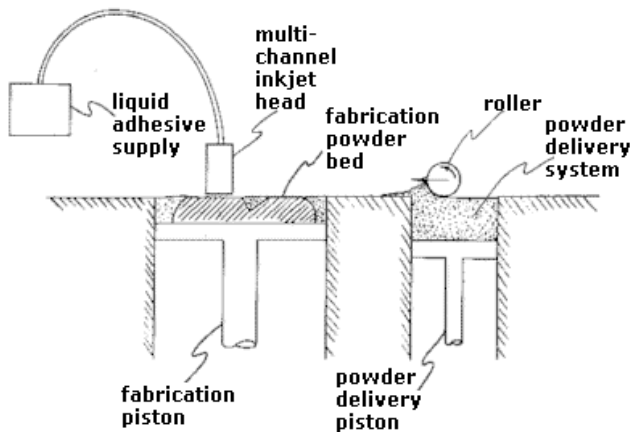


Fig. 54 – O mesmo processo em desenho

4.8. Solid Ground Curing – SGC

Este processo, também conhecido como o *Processo de Solidificação*, foi inventado e desenvolvido pela empresa Israelita *Cubital Inc.*®.

O processo SGC usa resina fotossensível endurecida em camadas tal como no processo de Estereolitografia (SLA). Contudo, ao contrário da SLA, o processo de SGC é considerado um processo de produção em massa, ou de alta taxa de produção. Esta alta taxa de produção é obtida, endurecendo cada camada de resina fotossensível de uma vez só. Várias partes podem ser criadas também ao mesmo tempo, devido ao espaço que a máquina de fabricação possui. O facto de possuir uma função automática de fresagem vertical, também acelera o processo de fabricação.

Estas capacidades multifunções também permitem fabricar modelos de dimensão já moderada (ex. 500x500x350 mm).

Áreas ocas são preenchidas com cera em cada camada de maneira a que haja apoio ao objecto a ser fabricado.

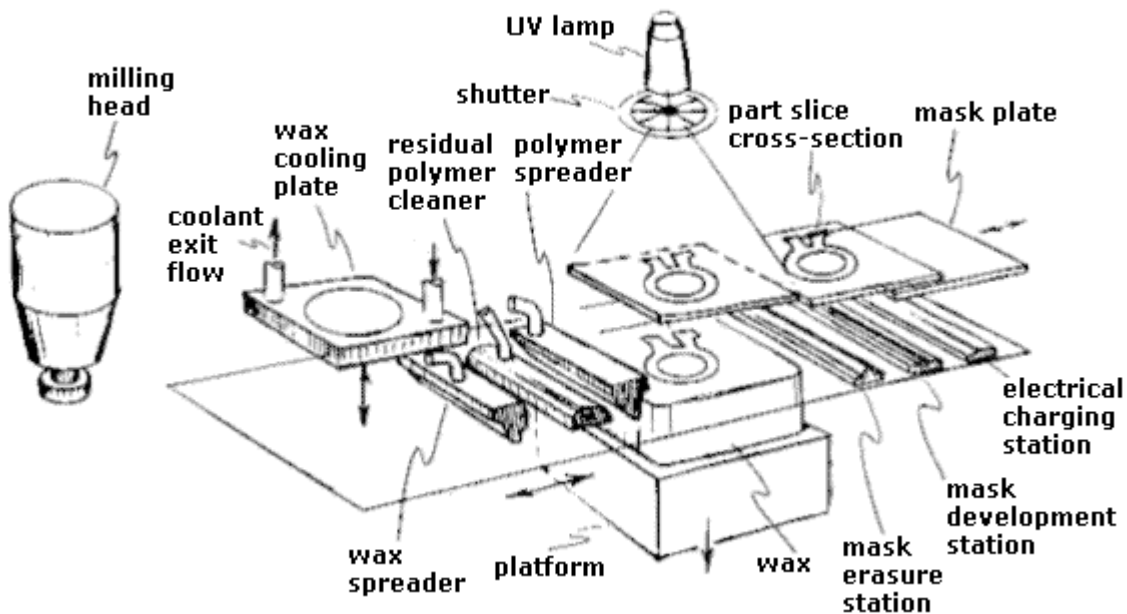


Fig. 55 – Aparato em desenho do SGC

4.8.1. Processo Gráfico do SGC

1.º Passo:

primeiro, um modelo CAD do objecto é criado e é dividido em camadas usando os dados do software *Cubital Front End*® (DFE®). No passo de criação de uma camada, a superfície plana é pulverizada com resina fotossensível:

STEP 1: Spray photosensitive resin.

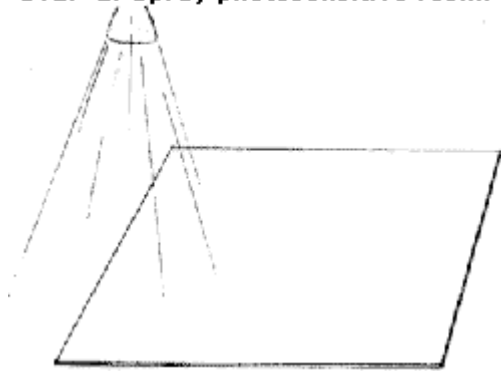


Fig. 56 – SGC – Superfície plana pulverizada

2.º Passo:

Para cada camada, uma foto máscara é produzida usando uma técnica *ionográfica**:

STEP 2: Develop photomask.

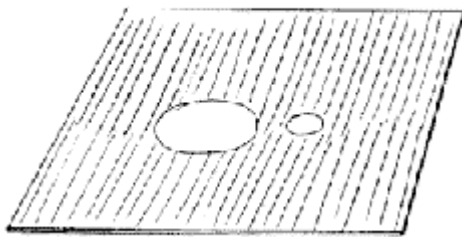


Fig. 57 – SGC – Foto-máscara

3.º Passo:

De seguida, a foto máscara é posicionada sobre a superfície de trabalho e uma potente lâmpada Ultra Violeta (UV) endurece a resina:

STEP 3: Expose photomask.

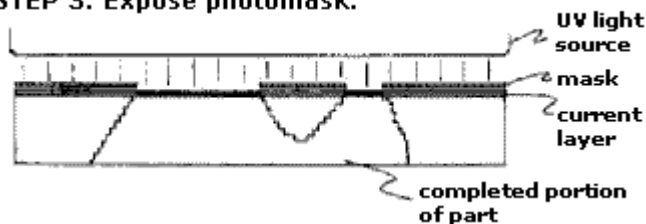


Fig. 58 – SGC – Endurecimento da resina com luz UV

4.º Passo:

Depois de a camada atingir a cura, toda a resina não curada é reciclada através de um tubo de vácuo, deixando intactas as áreas endurecidas. A camada curada é passada por uma luz UV linear para solidificar partículas remanescentes:

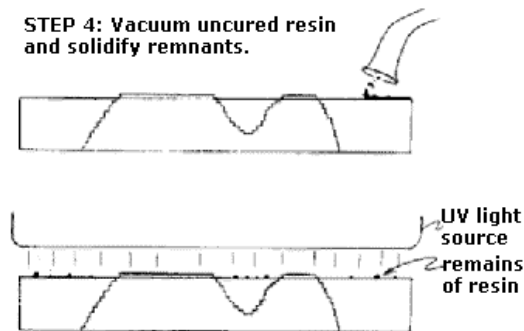


Fig. 59 – SGC – Tubo de vácuo retirando a resina não curada

5.º Passo:

Neste passo, a cera preenche as cavidades deixadas pela aspiração da resina líquida. A cera é endurecida por arrefecimento, de maneira a fornecer suporte sólido e contínuo ao modelo que está a ser fabricado:

STEP 5: Wax is applied to replace uncured resin areas.

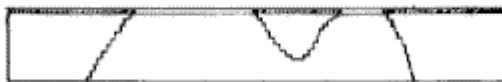


Fig. 60 – SGC – Aplicação de resina em áreas não curadas

6.º Passo:

No passo final antes da camada seguinte, a superfície de cera/resina é alisada de maneira plana para um acabamento preciso e fiável:

STEP 6: Top surface is milled flat.

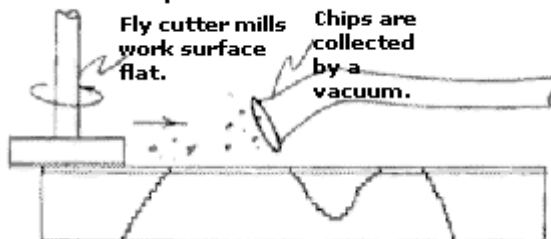


Fig. 61 – SGC – Remoção da cera e detritos, através do tubo de aspiração

Depois de todas as camadas estarem completas, a cera é removida e são executadas operações de acabamento. Não é necessário processo de pós-cura.

4.9. Inkjet Methods (impressão a jacto de tinta)

A impressão a jacto de tinta sucede da indústria de impressão e plotagem, onde estas técnicas envolvem a dispersão de pequenas gotículas de tinta em papel, de maneira a produzir imagem.

A PR a jacto de tinta utiliza esta técnica, mas para a dispersão de gotículas de compostos líquidos que se solidificam depois do processo, de maneira a criar camadas para a fabricação de um modelo físico.

Existem várias técnicas deste método no mercado tais como a *Sanders ModelMaker™*, *Muti-Jet Modeling™*, *Z402 Ink Jet System™* e *Three-Dimensional Printing* (impressão tridimensional).

Apesar de nenhuma destas técnicas estar estabilizada como os sistemas de *Estereolitografia (SLA)* ou *SLS (Selective Laser Sintering)*, algumas estão a demonstrar ser promissoras.

4.9.1. Sanders ModelMaker™

- Excepcional precisão que permite o uso na industria da joalheria
- A precisão de acabamento é permitida por alisamento depois de cada deposição de uma camada
- O sistema de plotagem é à base de uma tinta que solidifica, dispensando materiais à base de cera e termoplásticos.
- Comparado com o SLS e SLA não está tão estabilizado

A qualidade de acabamento suave da superfície deve-se ao traço prévio do perímetro numa camada, antes de preencher o interior. A cera de suporte é depositada em conjunto com o material termoplástico.

Esquema:

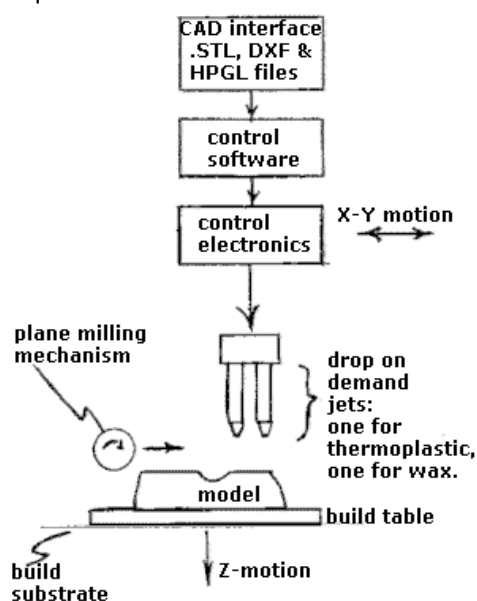


Fig. 62 – Esquema desenhado do interface Sanders ModelMaker

4.9.2. Multi-Jet Modeling™

- É um processo mais rápido
- *'Office-friendly'* (possível ter no local de trabalho) – os materiais não são tóxicos e apresentam pouco odor
- É de simples operação – pode operar como uma impressora de rede informática em ambiente de escritório.
- Comparado com o SLS e SLA, não tão estabilizado

Um dos sistemas possui uma cabeça de impressão de 96 elementos que deposita plástico derretido para processar camadas. O sistema é rápido comparado com outros métodos de PR e produz uma boa aparência final dos modelos, com o mínimo esforço de operação. Este método está direccionado para escritórios de engenharia, já que o dispositivo é pequeno, pouco ruidoso, não apresenta materiais tóxicos nem com muito odor.

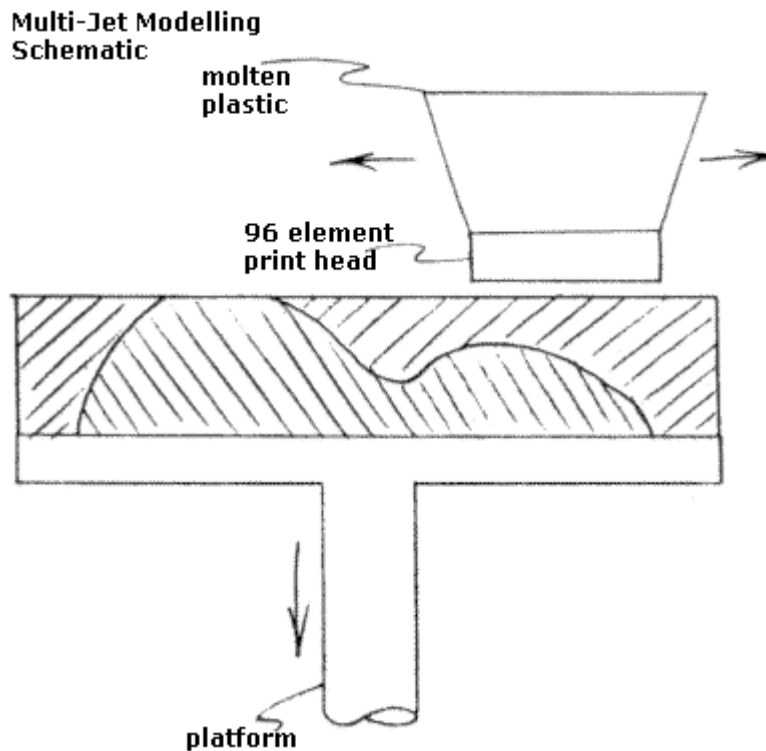
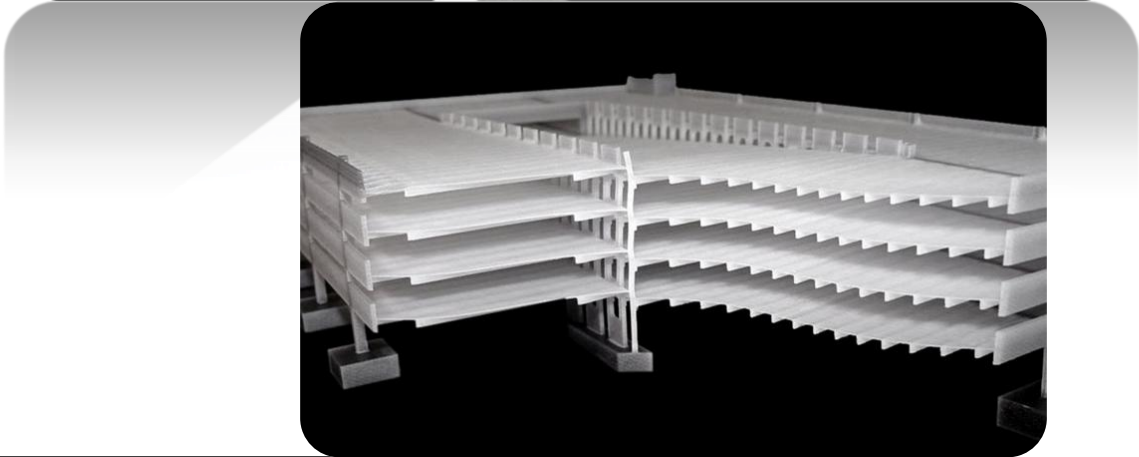
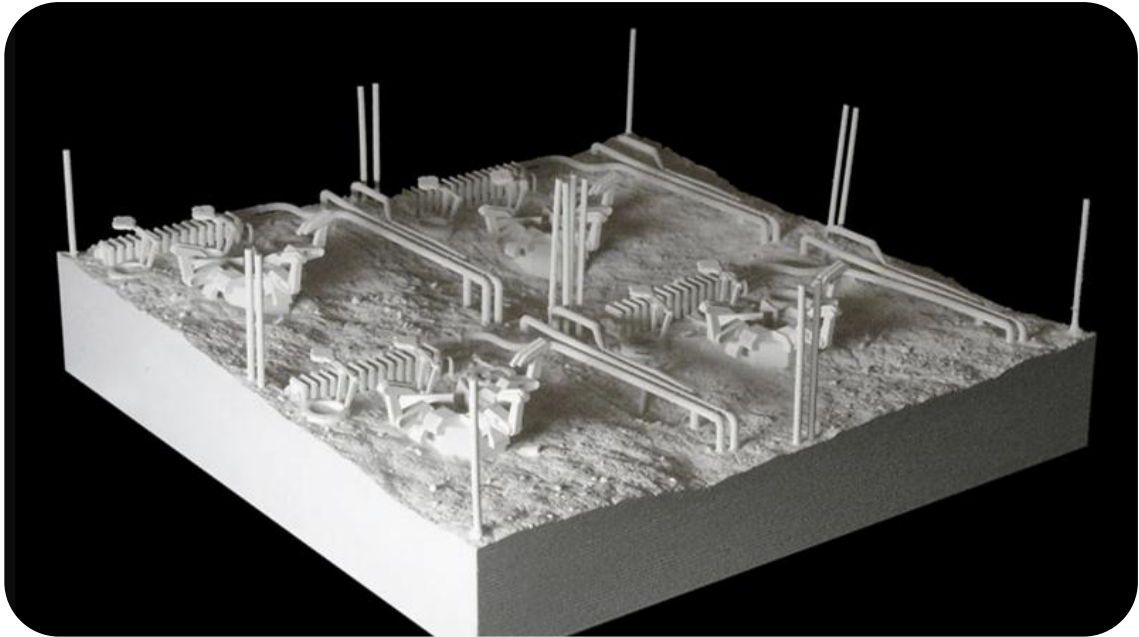


Fig. 63 – Multi-Jet modelling – uma boa opção para ter em ambiente de escritório

4.9.3. Impressão tridimensional – 3DP

(Método já abordado nos pontos 4.7 e 4.7.1)



Figs. 64, 65, 66 – modelos prototipados, mostrando vários níveis de complexidade



Figs. 67, 68, 69 – maquetas – a prototipagem rápida na arquitectura

5. Desenvolvimento prático do exercício relativo à Capela *de S. Frutoso de Montélios*, Braga



Fig. 70 – Modelo 3D da Capela de S. Frutuoso de Montélios

5.1. Capela de São Frutuoso de Montélios – um pouco de história

A Capela de São Frutuoso ou capela de São Frutuoso de Montélios é uma pequena capela datada da segunda metade do séc. VII. Está situada em S. Jerónimo Real, três quilómetros a noroeste da cidade de Braga, na direcção de Ponte de Lima.

Montélios é a tradução de «Monte Pequeno». Nas *Inquirições* do rei D. Dinis este local é chamado de «Montêlhos».

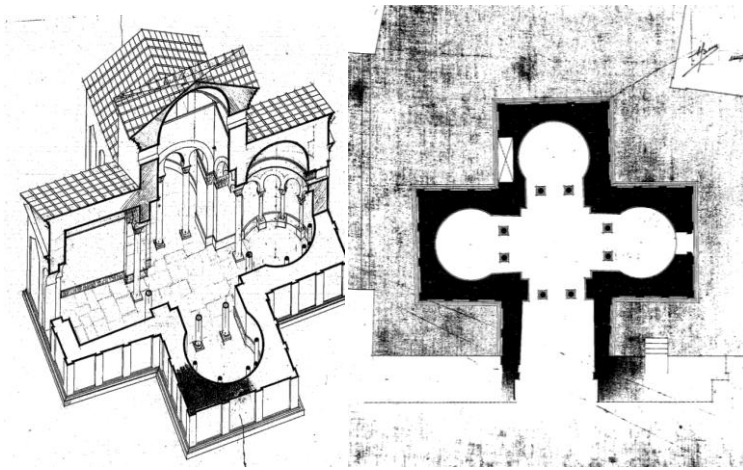


Fig. 71 – Perspectiva isométrica da Capela com corte horizontal e vertical Fig. 72 – Planta da Capela

Foi mandada construir por São Frutuoso, bispo de Braga e de Dume, e daí o seu nome actual. Inicialmente foi-lhe dado o nome de capela de São Salvador de Montélios. Foi edificado por São Frutuoso como seu próprio mausoléu, o que significa que foi construída entre 656, ano em que foi nomeado bispo de Braga, e a data da sua morte, em 665.

Durante o século XVII, foi incorporada no Convento de São Francisco. Ao longo da sua existência, esta capela sofreu diversas alterações. Durante a ocupação moura grande parte deste templo foi destruído, tendo sido reconstruído durante os séculos X e XI, o que lhe deu um aspecto visigótico. Esta capela foi classificada como Monumento Nacional.

À sua volta existia um conjunto monástico bem maior, centro religioso da região neste período, mas que terá sucumbido, muito provavelmente no início do século XVI, quando se procederam às obras de reedificação do Mosteiro por parte dos franciscanos. A capela de planta centralizada, de quatro absides iguais articuladas em redor de um cruzeiro quadrangular, é o único elemento de todo o conjunto monástico, datado da Alta Idade Média, que chegou até hoje.

A primitiva edificação, de época visigótica, seguiu um modelo orientalizante (ravenaico-bizantino), vigente na capital do reino, Toledo. Apresenta uma planta em cruz grega, motivos exteriores decorados com arcos cegos, alternadamente de volta perfeita e em mitra, torre

quadrangular sobre o cruzeiro, com cobertura em quatro águas. Depois da reconstrução, as ábsides, que eram de planta interna quadrangular, passaram a ter a forma semicircular, e à entrada de cada uma construiu-se uma tripla arcada de arco em ferradura, que compartimenta o espaço de acordo com a liturgia hispânica, então em vigor. Esta poderá ser uma leitura do conjunto remanescente, mas a verdade é que não existem certezas quanto às suas partes constituintes, em especial a ascendência de tão pequenas ábsides dotadas de falsos deambulatórios (pois no solo ainda existem marcas de bases de colunas).

Actualmente está contígua à Igreja Franciscana de São Frutuoso, foi redescoberta em 1897 e restaurada em 1931, trabalho que foi objecto de algumas controvérsias, devido a incertezas da sua base histórico-arquitectónica.



Fig. 73, 74, 75, 76 – Igreja de São Frutuoso – imagem exterior da Capela – interior da Capela – reconstrução em 1931

5.2. Desenvolvimento do trabalho prático

Nesta segunda parte do trabalho pretendeu-se um desenvolvimento prático integrando as duas tecnologias em estudo, o VL3D e a PR.

Ainda no princípio da execução da tese discutiu-se que monumento se iria tentar produzir a partir de uma nuvem de pontos para depois fabricá-lo através de prototipagem rápida. Falou-se na possibilidade da Janela Manuelina do Convento de Cristo em Tomar, entre outras possibilidades.

Depois da discussão com o Prof. Orientador Francisco Agostinho e Prof. Assistente Luís Mateus sobre qual seria o objecto arquitectónico a tratar, tomou-se a decisão de tratar o exemplo da Capela de São Frutuoso de Montélios.

Foi então por aconselhamento do Prof. Luís Mateus tratar este monumento, visto que já existia informação pertinente para começar a componente prática.

Entre vários trabalhos de investigação do Prof. Luís Mateus, encontra-se a capela de Montélios.

Esta investigação a cargo do Professor enquadra-se na sua tese de Doutoramento com o título "*Contributions to Conservation, Restoration and Rehabilitation planning design: Documentary Methodology based in terrestrial digital photogrammetry and 3D laser scanning*", integrado no projecto de pesquisa Arch3D e feito com a parceria de várias instituições: *Faculdade de Arquitectura da Universidade Técnica de Lisboa, Departamento de Arqueologia da Universidade do Minho, Universidade de Coimbra, Laboratório de Fotogrametria da Escola Técnica Superior de Arquitectura – Universidade de Valladolid e o IGESPAR* (instituto responsável pela gestão do património arquitectónico em Portugal).

Mais informação no site oficial do Professor Luís Mateus em

<http://home.fa.utl.pt/~lmmateus/investigacao.html> e Arch3D <http://arch3d.fa.utl.pt/>

Foram-me apresentados alguns exemplos de resultados feitos pelo mesmo processo.

Um dos exemplos esteve a cargo do Prof. Francisco Agostinho que fez uma experiência fabricando uma das naves da Capela de Montélios.

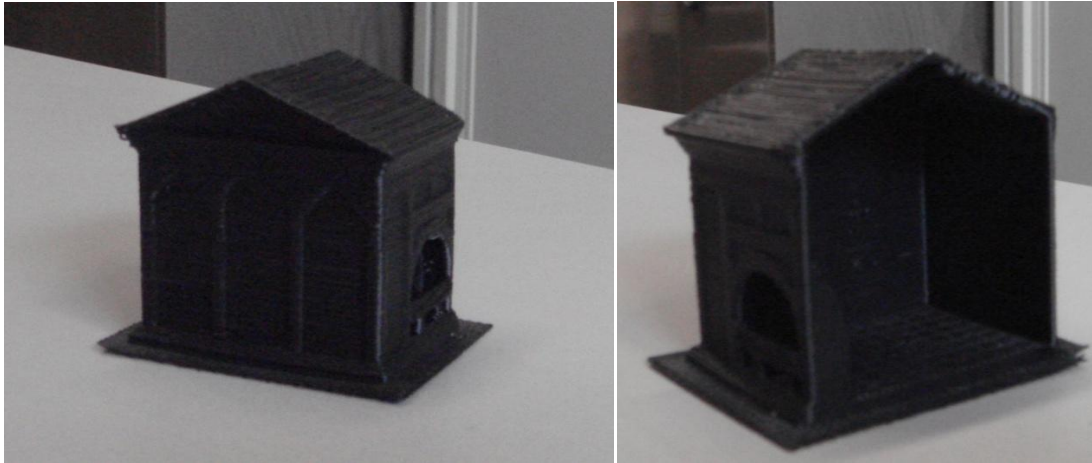


Fig. 77, 78 – Parte fabricada pelo Prof. Dr. Francisco Agostinho

A primeira proposta sugerida seria fazer um exercício similar, mas aumentando a quantidade de objectos fabricados. Seria interessante fabricar pelo menos as duas naves ortogonais a esta nave principal, utilizando o mesmo método.

O método de *workflow*, ou os vários procedimentos seriam então os seguintes:

- 1- Optimizar o *mesh* utilizando o *plugin ReduceMesh* no programa *Rhinceros*
- 2- Redefinir/regularizar a geometria do objecto – usar *SketchUp, AutoCAD*
- 3- Exportar para formato *.3ds*
- 4- Importar o ficheiro *.3ds* para *3DStudioMax* ou *Rhinceros*.
- 5- Exportar para formato *.stl*
- 6- Importar o *.stl* no programa *Skeinforge* e gerar o código da máquina

O objecto seria depois fabricado na máquina *Makerbot*, que pertence à Faculdade de Arquitectura da U.T.L.

Esta é um tipo de máquina personalizável, que se compra por peças e depois é necessário montá-la. Com a ajuda de alguém que tenha conhecimentos de programação/electrónica, é uma boa solução até para se ter em casa, por ter um preço acessível. (Mais à frente no capítulo da fabricação, abordarei mais aprofundadamente a máquina *Makerbot*).

Mas as peças saíam com a mesma escala, pequena, e cada camada de polímero assentaria num só fio de polímero.

Poderia ser uma solução, mas como já tinha sido feito discutiu-se então se não seria mais interessante trabalhar as várias partes do modelo 3D, criando espessura em cada fachada. Assim poder-se-ia explorar outro método diferente, com outro software 3D e fabricar os objectos a uma escala maior.

Mais ainda, em vez de se regularizar geometricamente o objecto, manter-se-ia a malha gerada pela nuvem de pontos, dando um acabamento mais autêntico, com a rugosidade das fachadas e coberturas da capela.

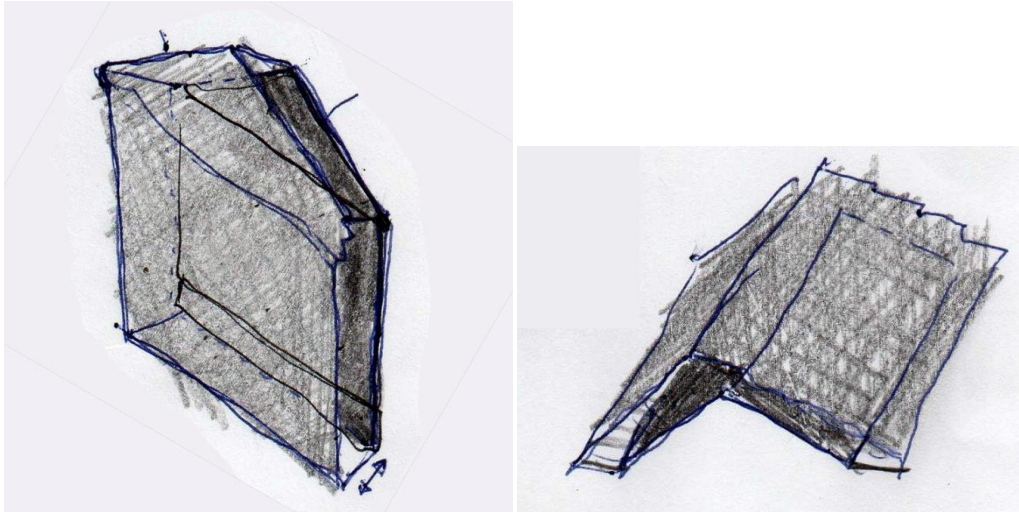


Fig. 79, 80 – Primeiros esboços sobre como operar nas várias fachadas e coberturas.

Depois de alguma discussão com o Prof. Luís Mateus acordámos então tratar o desenho 3D desta maneira diferente. Havia entusiasmo de ambas as partes e de seguida começámos a discutir que tipo de programa 3D iria ser usado para o tratamento do modelo.

Hoje em dia existem inúmeros programas 3D que fazem de tudo um pouco a nível de operações de edição. O que um programa não faz o outro faz, e vice-versa. Existem programas gratuitos na internet mas limitados e existem os completos mas que são por vezes bastante caros.

Depois de receber várias dicas em relação a programas que poderia usar (*SketchUP*, *Minimagics*, *Meshlab*, etc.) verificou-se que o programa mais adequado e completo para a edição seria o *Rhinoceros*.

Depois de alguma familiarização com o programa *Rhinoceros* e com a ajuda do Prof. Luís Mateus, comecei a compreender o seu funcionamento de acordo com as operações que teria de executar. Ao explorar o programa mais aprofundadamente e lendo tutoriais que me foram fornecidos, rapidamente me familiarizei com os comandos de edição.

Todo o trabalho era agora mais ou menos de inspeção das malhas para eliminar partes incoerentes, duplicadas ou orifícios.

Depois de encontrar os erros, a rotina será desfazer os erros e refazer as partes da malha. Se possível reduzir o número de polígonos para tornar o desenho 3D mais leve.

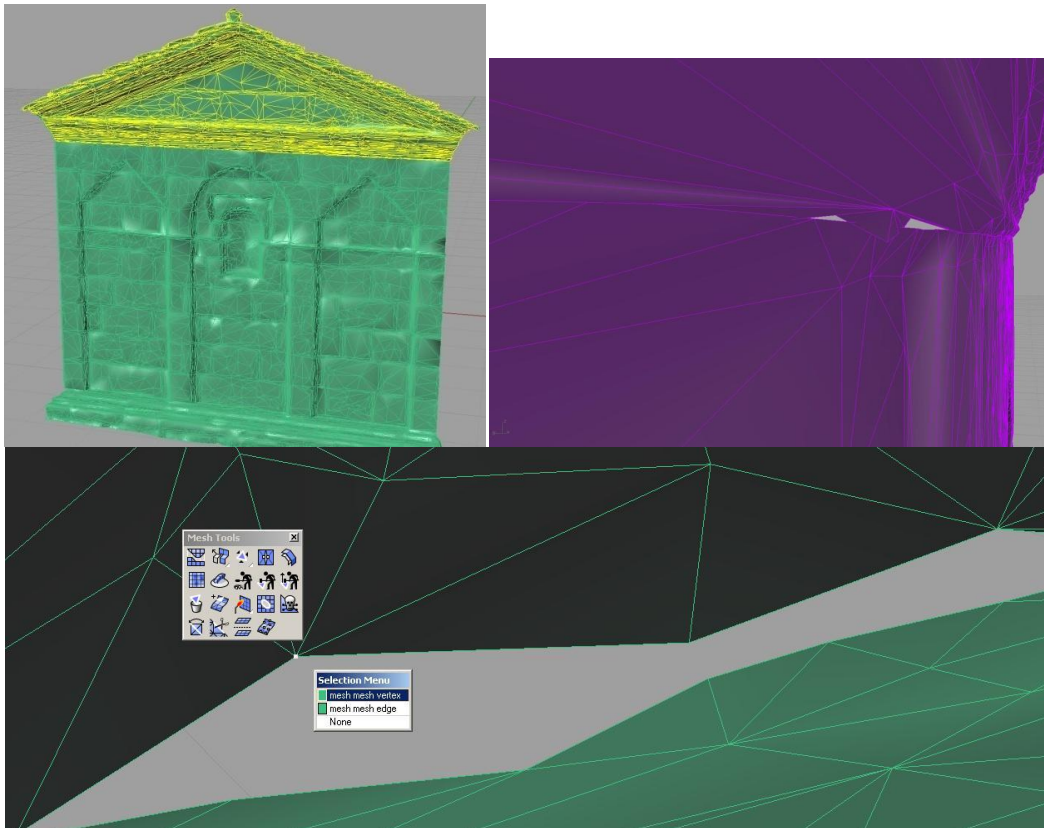


Fig. 81, 82, 83 – fachada separada em várias malhas – erros espaciais – operação de tratamento dos polígonos nas malhas

Resta no fim garantir que cada troço criado seja uma e uma só malha, sem erros, simplificada tanto quanto possível sem comprometer a sua forma original (redução de polígonos) e sem orifícios.

Depois desta fase de edição há que testar cada troço de fachada através do programa *MiniMagics*, para saber se a peça tem condições de ser fabricada.

De seguida é necessário então gerar o código da máquina através do programa *Skeinforge*. No fim, se tudo estiver correcto, cada peça será fabricada na máquina *Makerbot*.

Discutiu-se também a possibilidade de fabricar a peça numa empresa especializada. O processo seria mais rápido, mas também seria mais caro.

Por este mesmo motivo optou-se pela fabricação peça a peça, em vez de 5 fachadas de uma só vez.

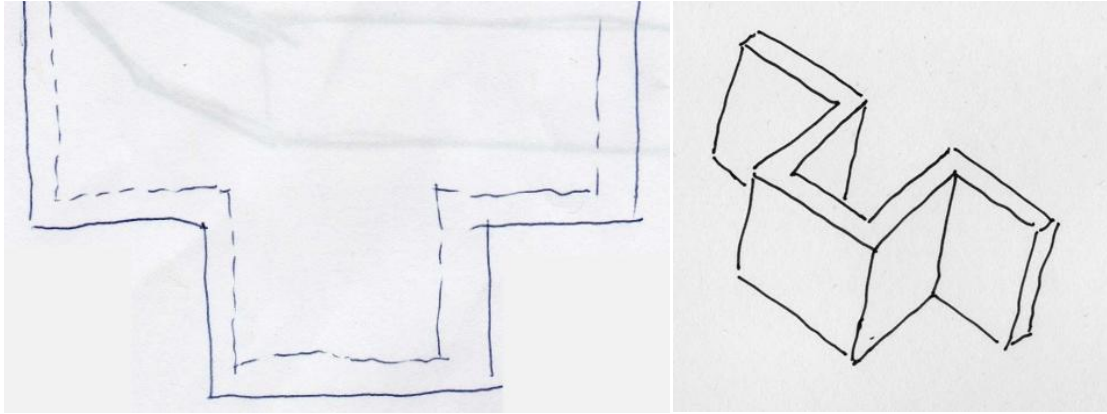


Fig. 84 – Primeiro esquema pensado para a fabricação do modelo

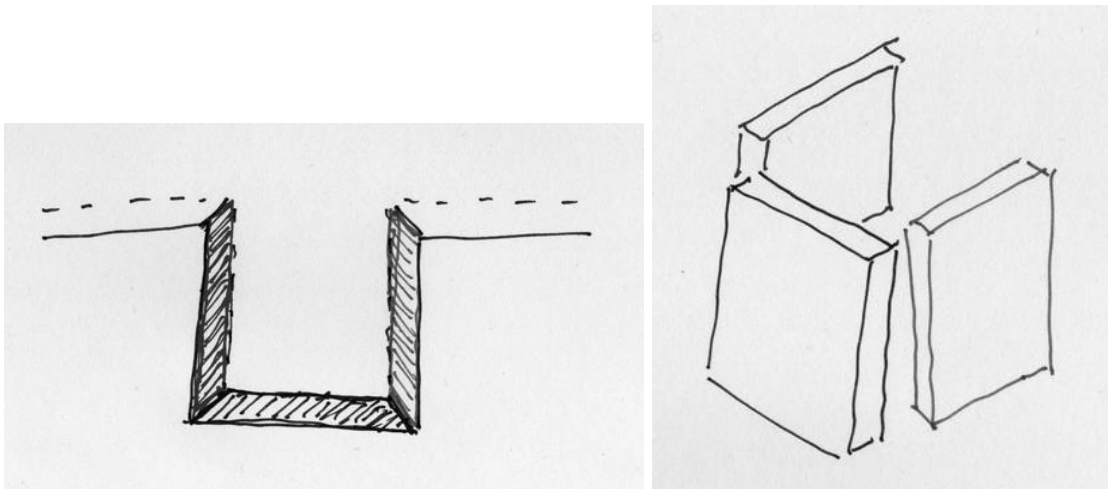


Fig. 85 – O esquema anterior ocupa uma área muito grande, logo mais caro de fabricar. Assim optou-se pela fabricação dos vários troços de fachada

O capítulo que se segue descreve de uma forma abreviada, todos os passos dados desde a obtenção do objecto em 3D por varrimento laser, até estar preparado para a fabricação. Como não havia a noção do tempo que iria ser dispendido durante as operações de tratamento do desenho 3D, optou-se por tratar a nave frontal, as duas fachadas adjacentes e respectivas coberturas. Tentarei assim explicar os processos necessários para o tratamento, bem como a organização do desenho em ambiente 3D e os comandos utilizados. Achei interessante dar o título “*Do Real ao Protótipo*” por ser um título que sugere algo ‘reversivo’ em relação ao objectivo da articulação destas duas tecnologias. Contudo, não quer dizer que não se opere desta maneira num projecto ligado à recuperação ou projecto de arquitectura. Seja como for é um título que pretende explorar o entendimento destes processos.

Todas as imagens foram retiradas durante o trabalho e apresentam uma breve explicação da operação efectuada.

No fim existe um link para um vídeo com a duração de três minutos mas que concentra todo o processo, desde a fase do desenho em bruto até à preparação das fachadas para fabricação.

6. CONSTRUÇÃO DO MODELO EM 3D – PROGRAMA *RHINOCEROS 4.0* “Do real ao protótipo”

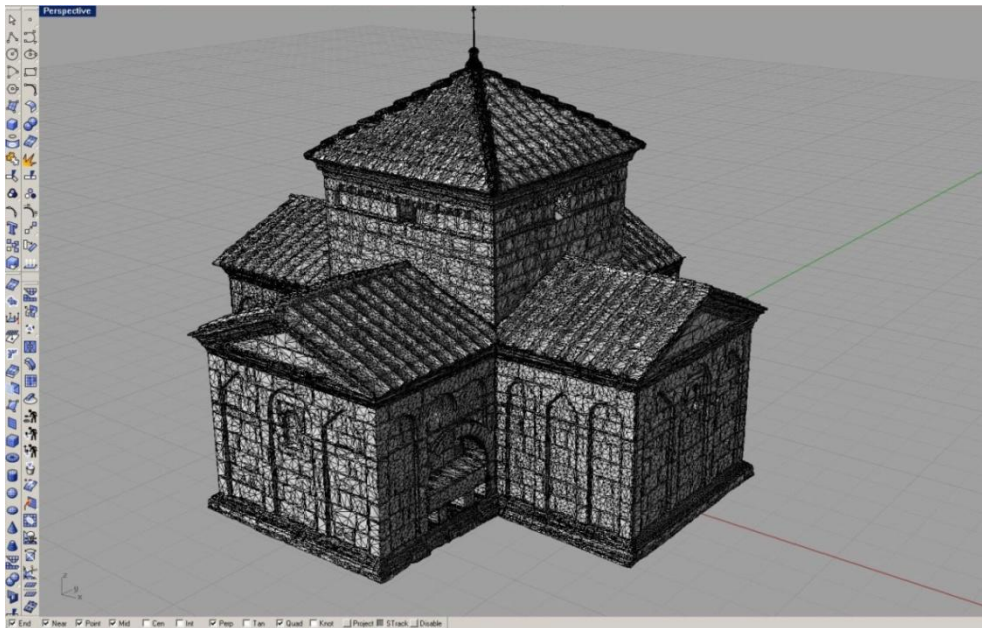


Fig. 86 – Malha em ‘bruto’, gerada a partir da nuvem de pontos – Capela de S. Frutuoso de Montélios, Braga – Rhinoceros 4.0

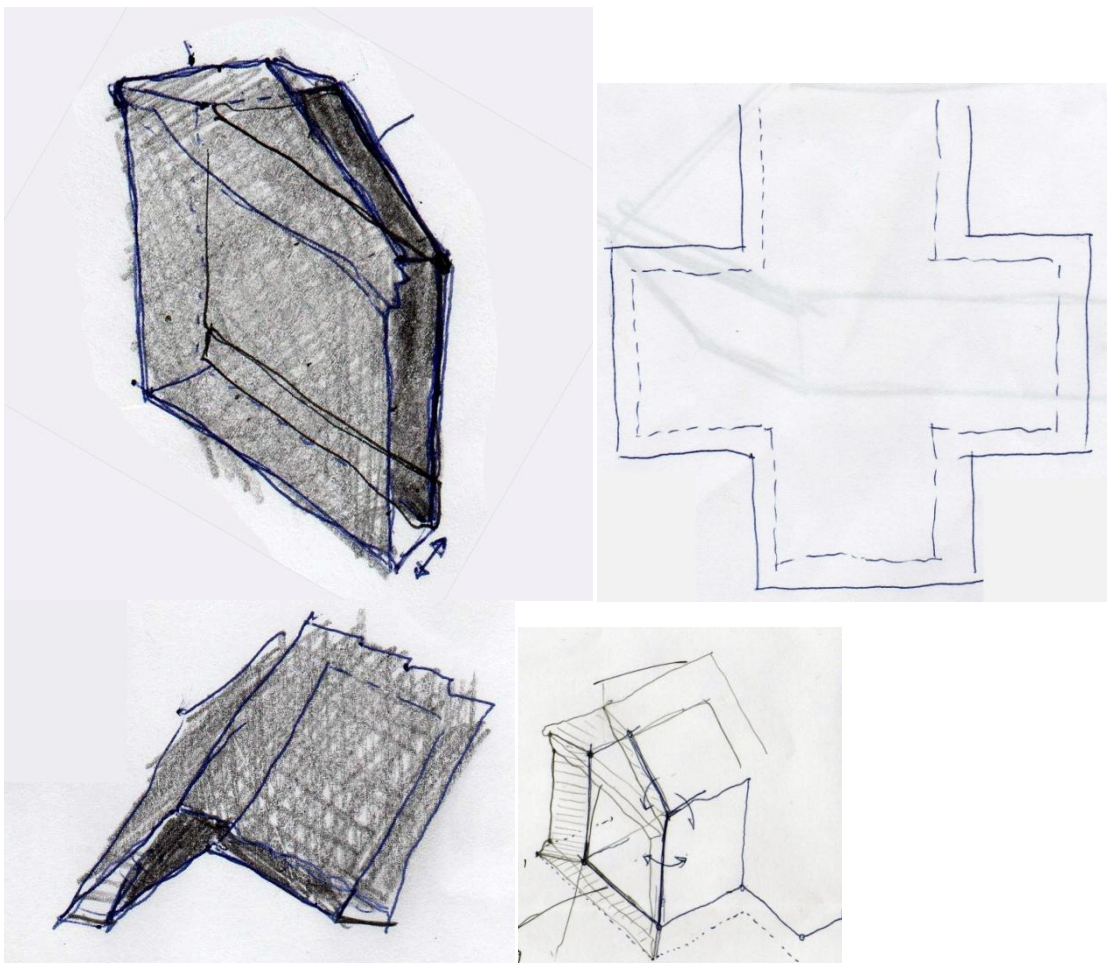


Fig. 87 – Primeiros esboços sobre como operar nas várias fachadas.

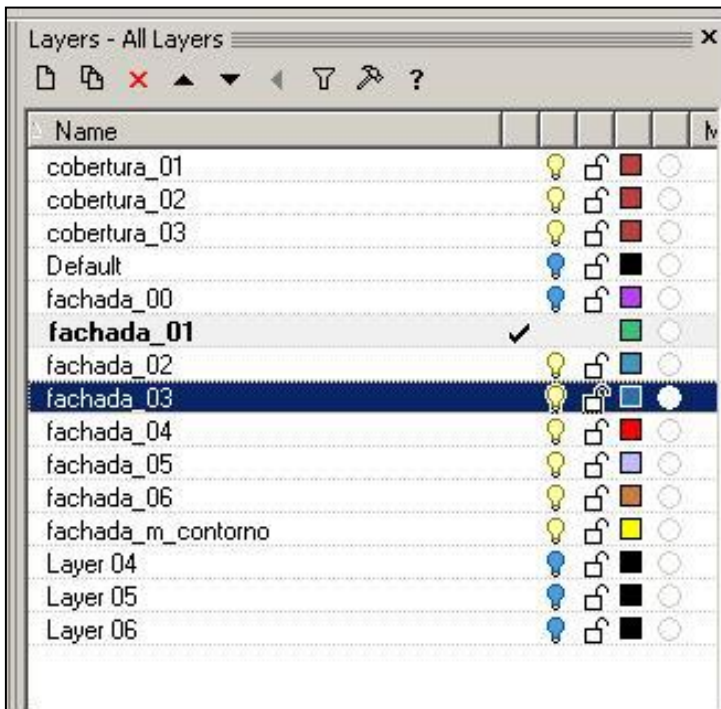


Fig. 88 – Criação de *Layers* para cada fachada de maneira a otimizar o processo de execução das operações 3D – Rhinoceros 4.0

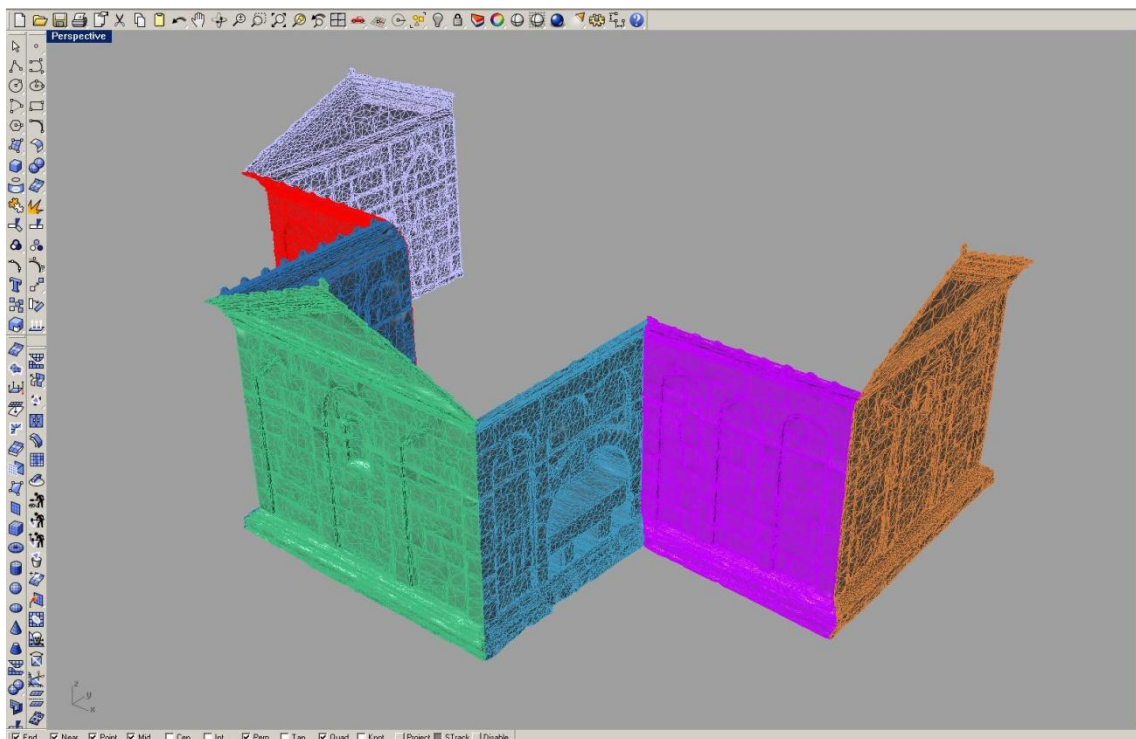


Fig. 89 – Modelo em 3D representando as malhas escolhidas nos respectivos layers de cores diferentes – Rhinoceros 4.0

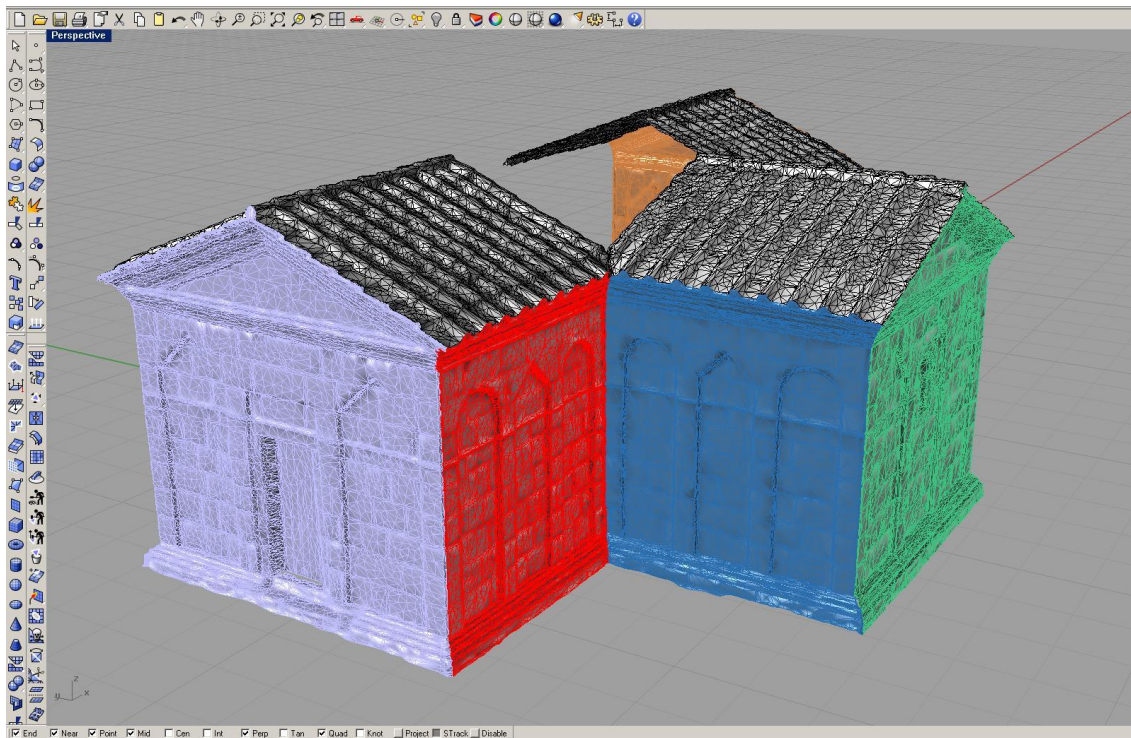


Fig. 90 – Modelo em 3D representando as malhas escolhidas para tratamento (aqui com as coberturas) – Rhinoceros 4.0

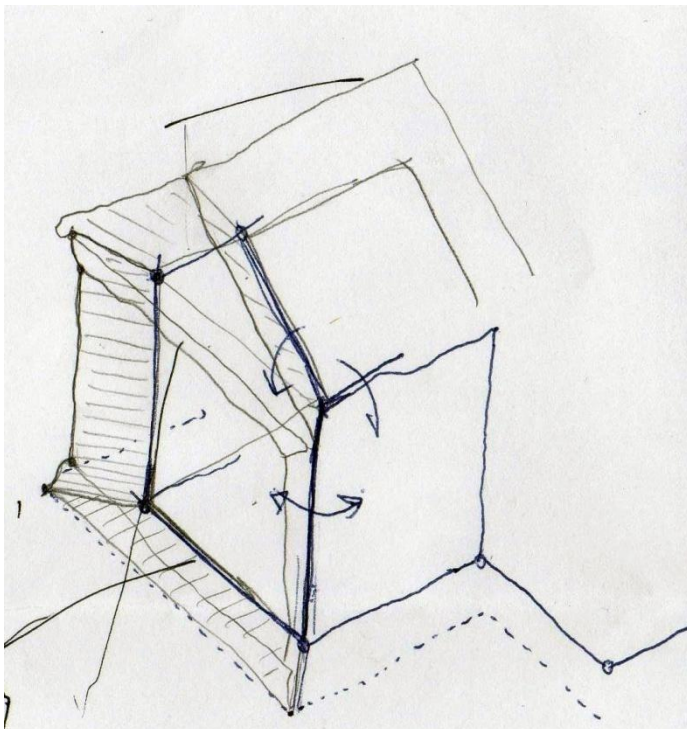


Fig. 91 – Estrutura interna auxiliar

Deverá ser criada uma estrutura regular interna auxiliar, de maneira a que a malha da fachada fique ligada com uma superfície interior.

Este troço de fachada deve ser estanque e a malha original deverá ser ligada à superfície interior através de um 'plano' aparente a 45º, de maneira a que as fachadas contíguas obedeam ao mesmo método.

O plano referido não se trata de um plano, mas sim de um conjunto de polígonos triangulares que ligam a malha irregular à superfície regular interna.

Todo o troço deverá ser uma única malha sem erros, sem polígonos duplicados, 'spikes' (picos) e sem orifícios.

A superfície regular depois de unida à malha, torna-se parte da malha.

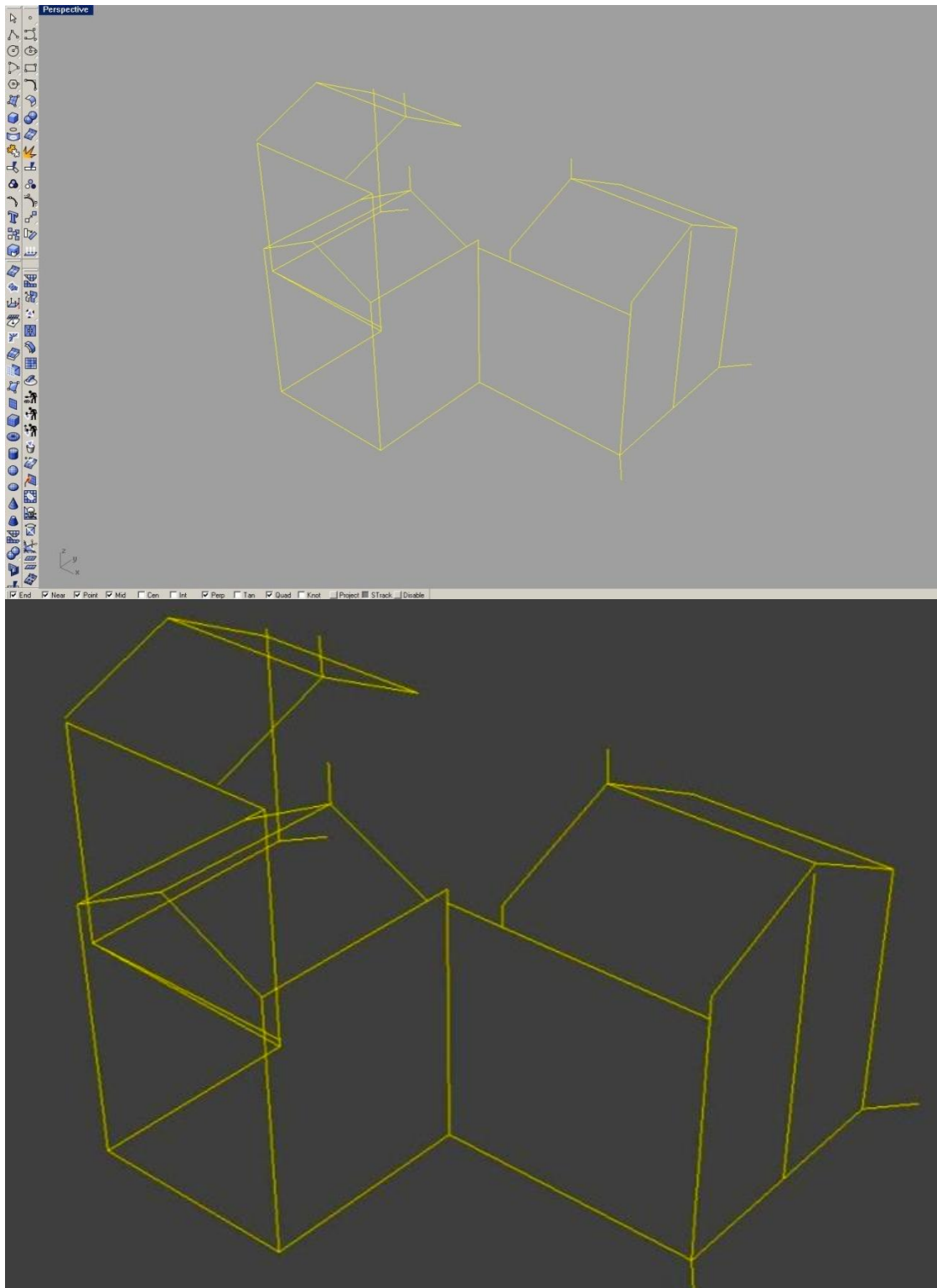
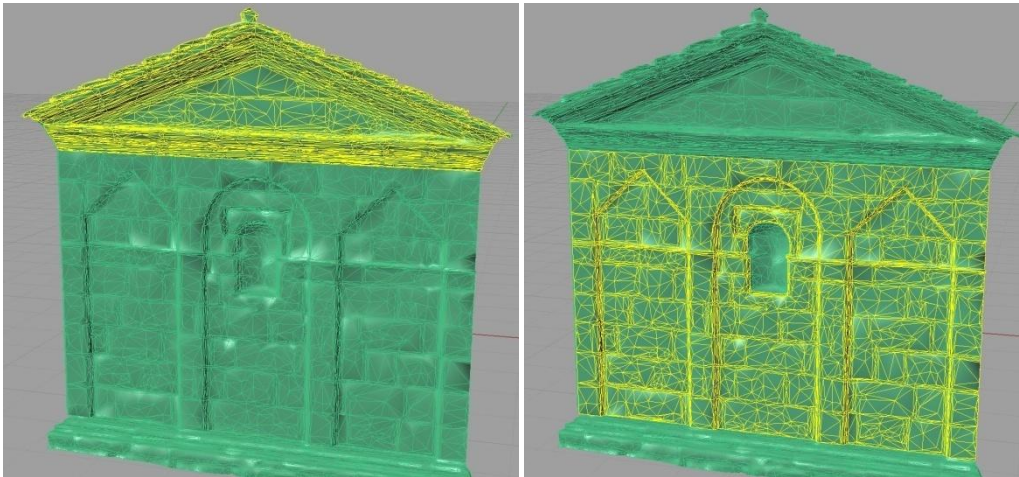
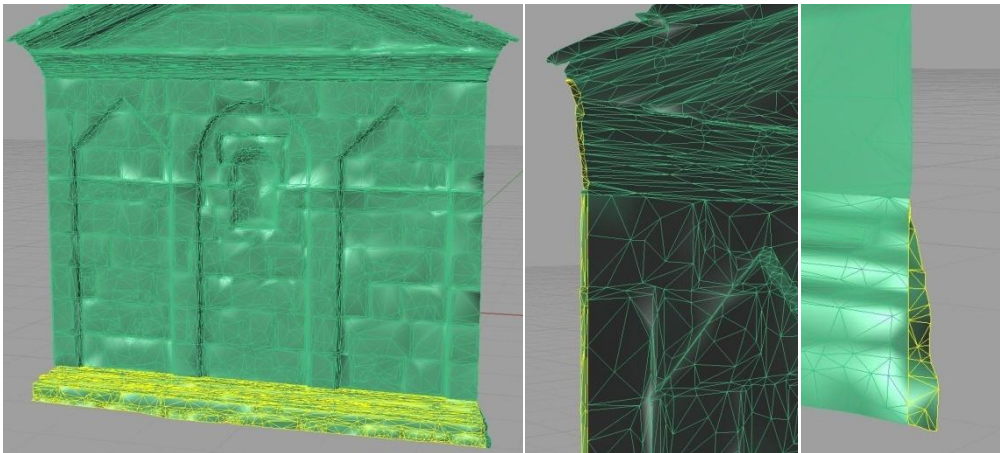


Fig. 92 – Estrutura regular interna auxiliar – *Rhinoceros 4.0*

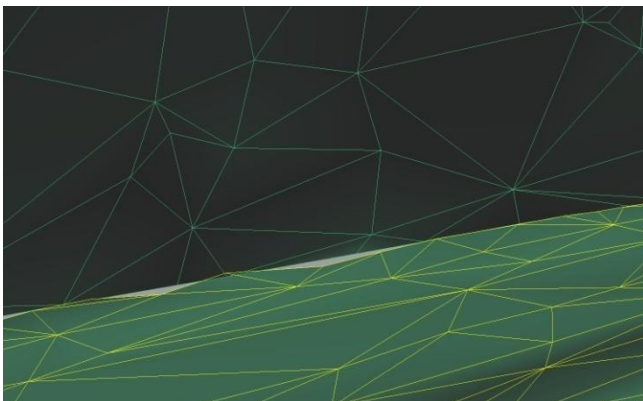
6.1. TRATAMENTO DAS MALHAS



Depois de se utilizar o comando 'Explode', a malha fica dividida em várias malhas – aqui pode-se observar a malha correspondente ao frontão (*Ático*) e fachada principal (*Plano Nobre*).



Aqui a malha da base (*Embasamento*) e malhas das faixas marginais.



Todos os polígonos devem estar unificados, devendo partilhar os mesmos vértices e arestas. Aqui a junção entre a malha da fachada principal está desalinhada com a malha da base. Observam-se orifícios e triângulos desalinhados.

Figs. 93, 94, 95, 96, 97 – As várias sub-malhas constituintes da malha principal

Fig. 98 – Malhas separadas e desalinhadas

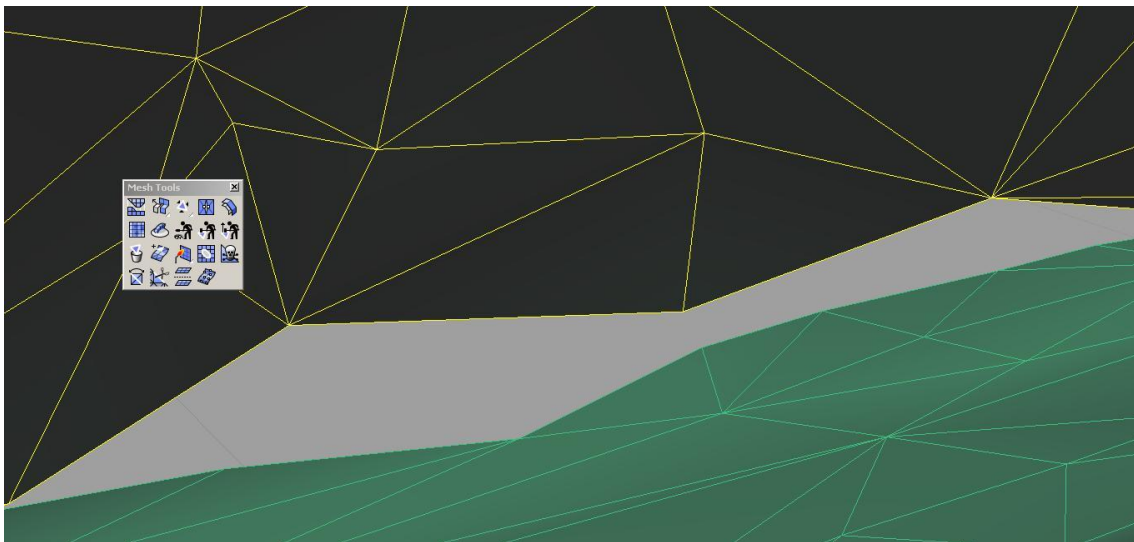
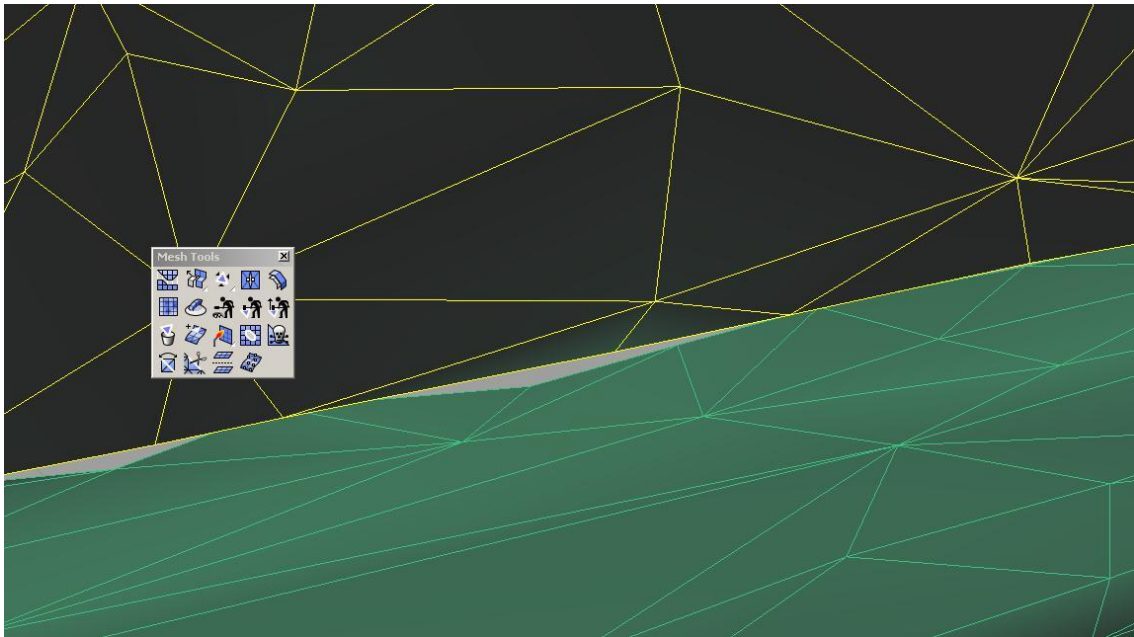



Fig. 99, 100 – Utilizando o comando `_DeleteMeshFaces` carregando no respectivo botão , menu *Mesh Tools*, apagam-se os triângulos necessários.

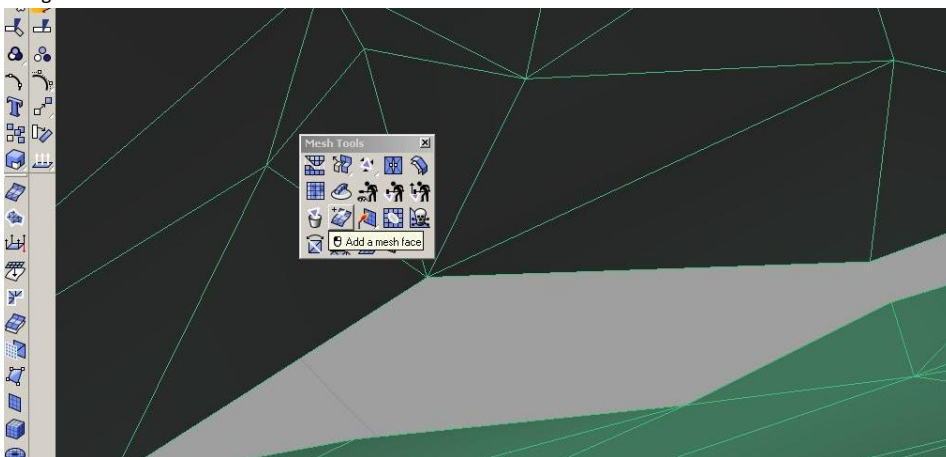



Fig. 101 – Carregando no botão *Add mesh face*  → *Mesh Tools Menu*, clica-se em cima dos respectivos vértices para criar um triângulo.

Nota:



Fig. 102 – Linha de comandos – *Rhinceros 4.0*

Ao escolher o comando acima, a linha de comandos apresenta a opção de juntar o novo triângulo à malha.

Esta opção vem activada por defeito. Se não se quiser juntar o triângulo à malha, carrega-se em 'J' e a linha de comandos passa a apresentar a informação '*JoinMesh=No*'.

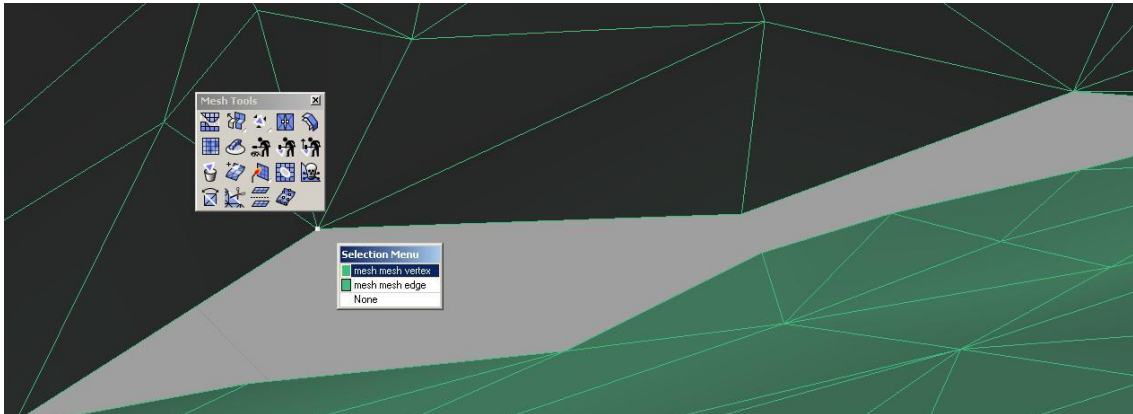


Fig. 103 – Quando se clica num dos vértices pode aparecer um sub-menu para escolher entre vértice (*vertex*) ou aresta (*edge*).

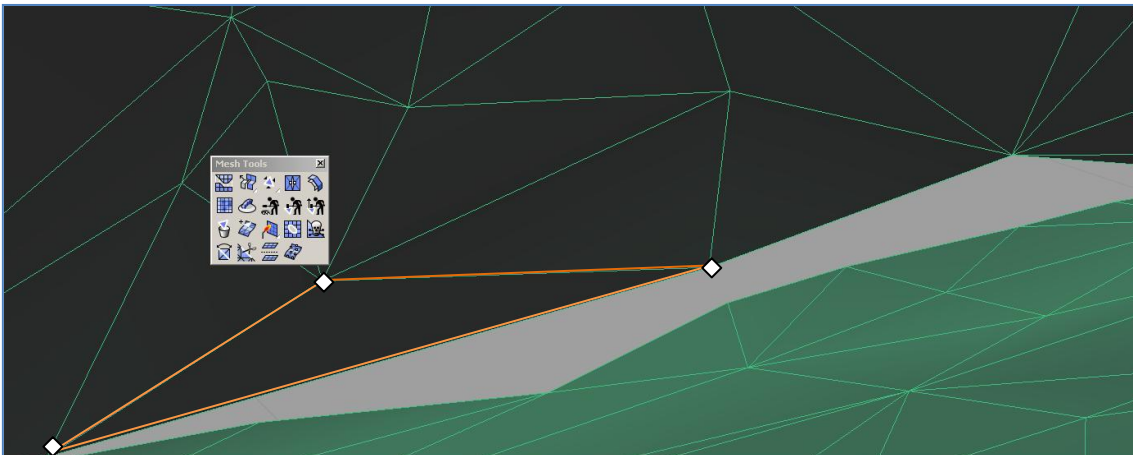



Fig. 104 – Depois de se 'picarem' os três vértices, o novo triângulo é criado.



Fig. 105 – O processo repete-se até que a malha fique refeita e unida.

Depois de se executarem estas operações em cada uma das malhas, executa-se a operação *Join* → *Main1 Menu* com o respectivo botão , para que a fachada se torne numa única malha sem erros.

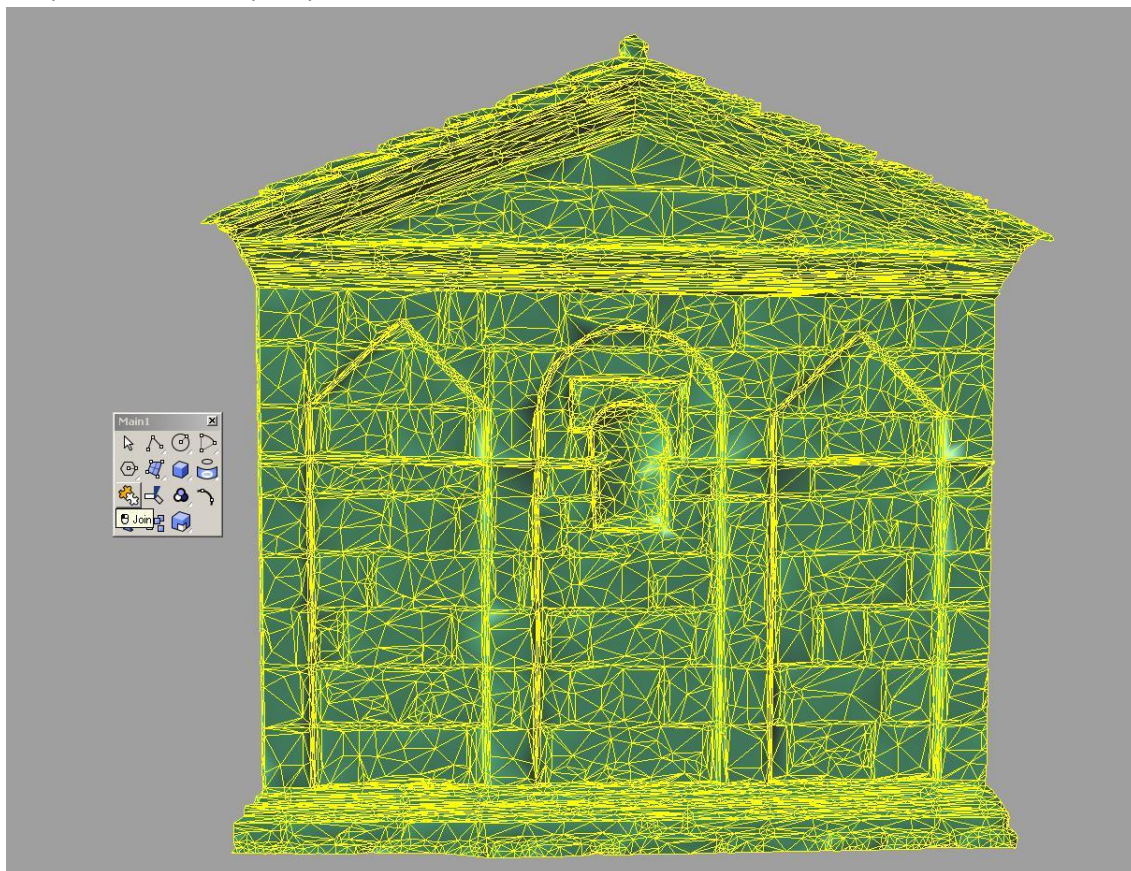
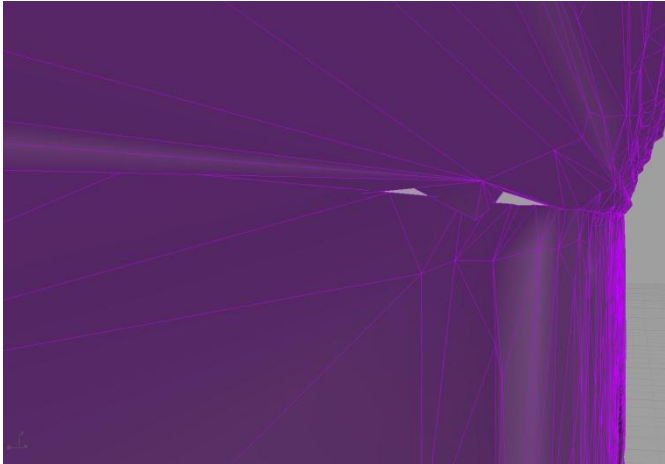


Fig. 106 – Malha unificada

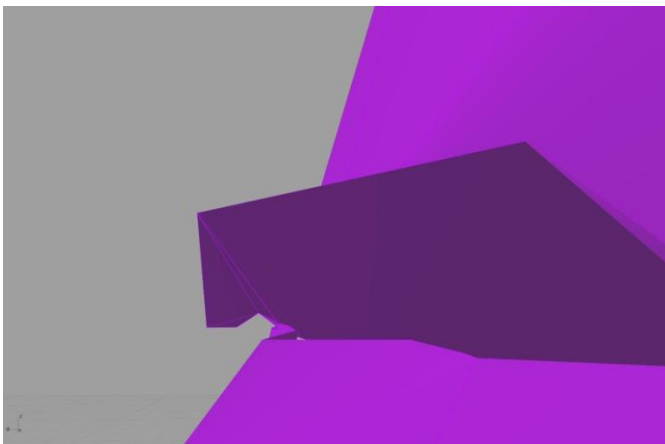
Nota:

Todo o processo de tratamento acima descrito consiste sobretudo numa inspeção das várias 'sub-malhas', desfazer uma porção da malha, e de seguida refazê-la de maneira correcta.

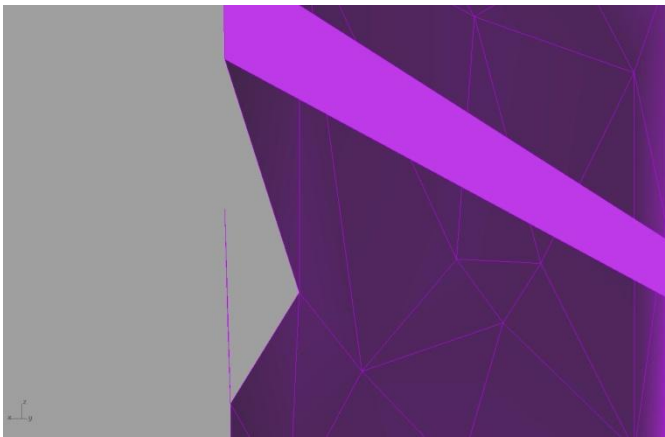
Erros comuns nas malhas:



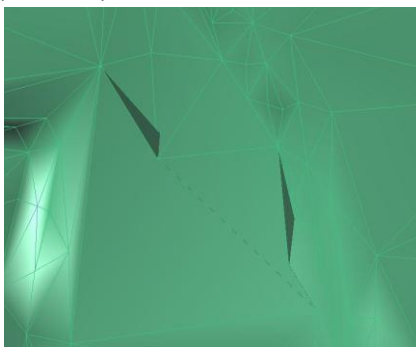
intersecção de polígonos



polígonos incoerentes e desalinhados espacialmente



picos ou 'spikes'



polígonos duplicados ou sobrepostos

Fig. 107, 108, 109, 110

6.2. CONSTRUÇÃO DOS TROÇOS DE FACHADA

O próximo passo será a criação da superfície interna regular.

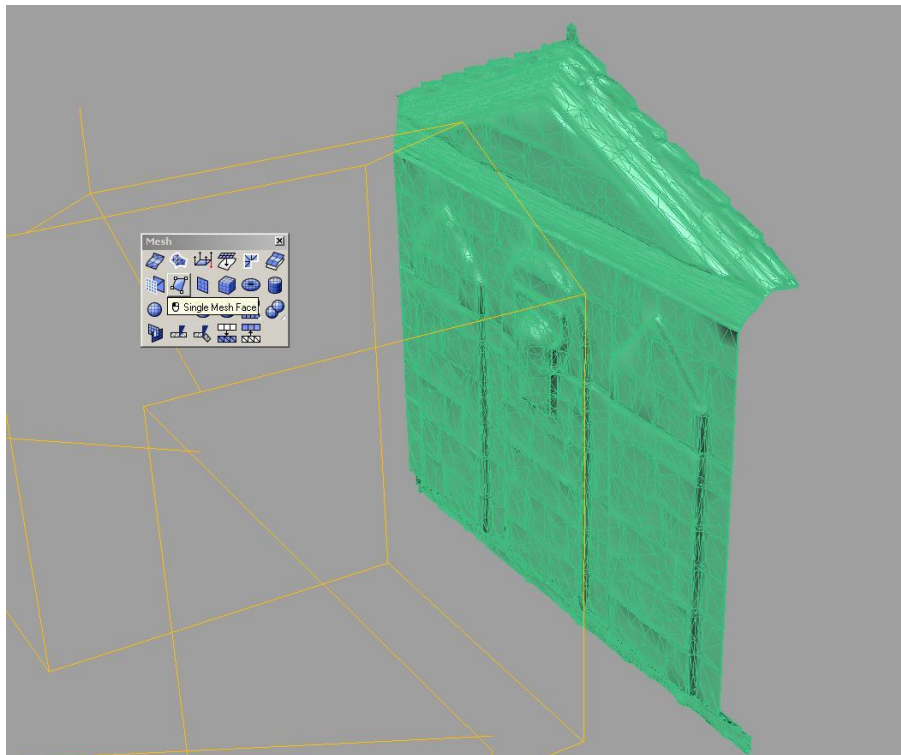


Fig. 111

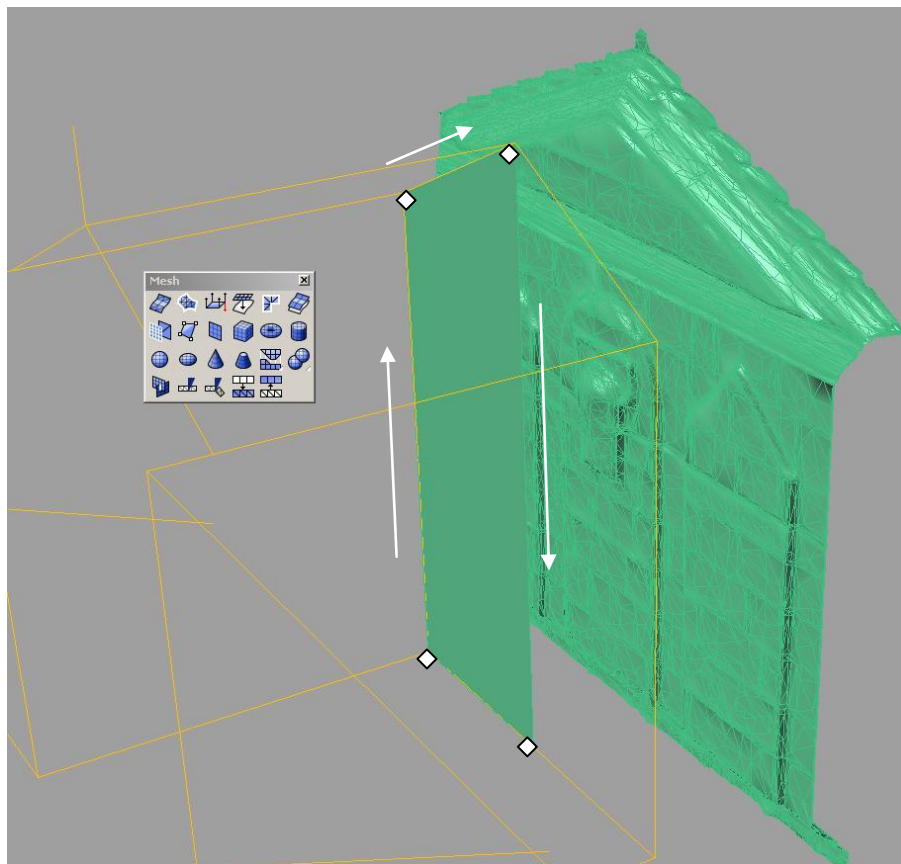



Fig. 112

Utilizando o comando `_3DFace` → *Mesh Menu*, botão  *Single Mesh Face*, e recorrendo à estrutura interna, cria-se a superfície picando sequencialmente em 4 pontos. Este comando permite criar uma superfície com 3 pontos ou 4, desde que o 4.º ponto pertença ao mesmo plano.

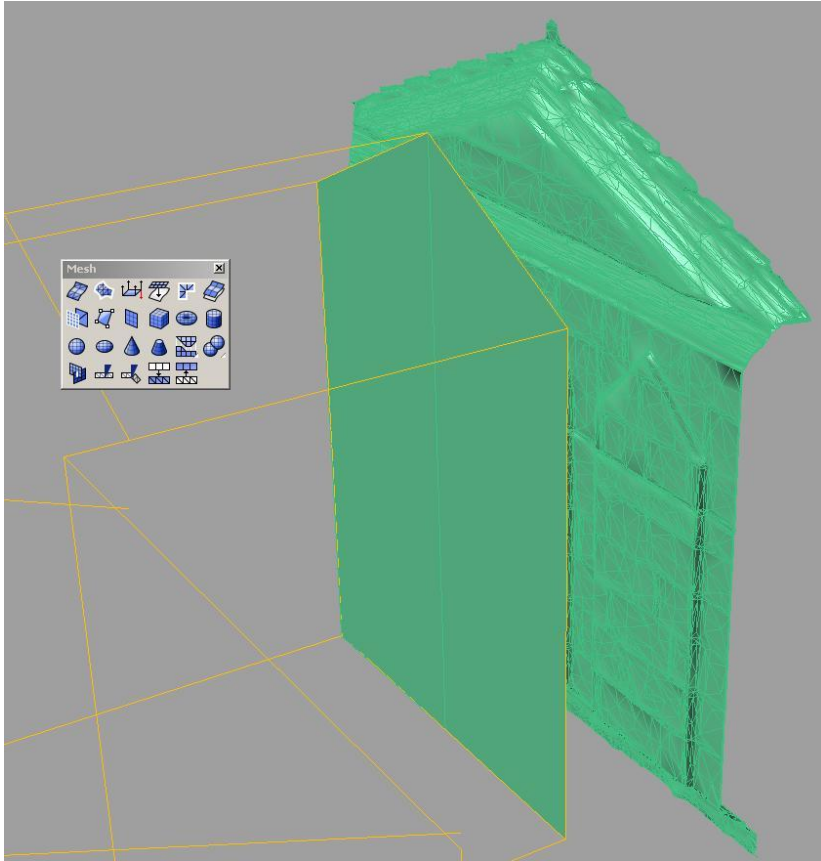


Fig. 113

Neste exemplo, como a superfície interna é constituída por 5 arestas, devem-se criar duas superfícies iguais com 4 arestas e depois unificá-las.

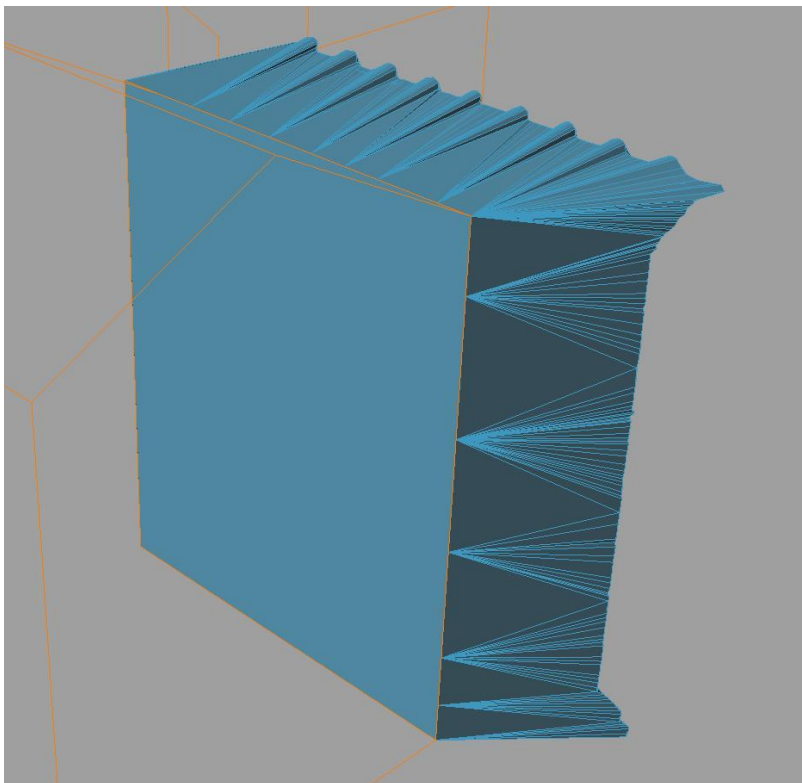


Fig. 114

Um exemplo de superfície interna com 4 arestas.

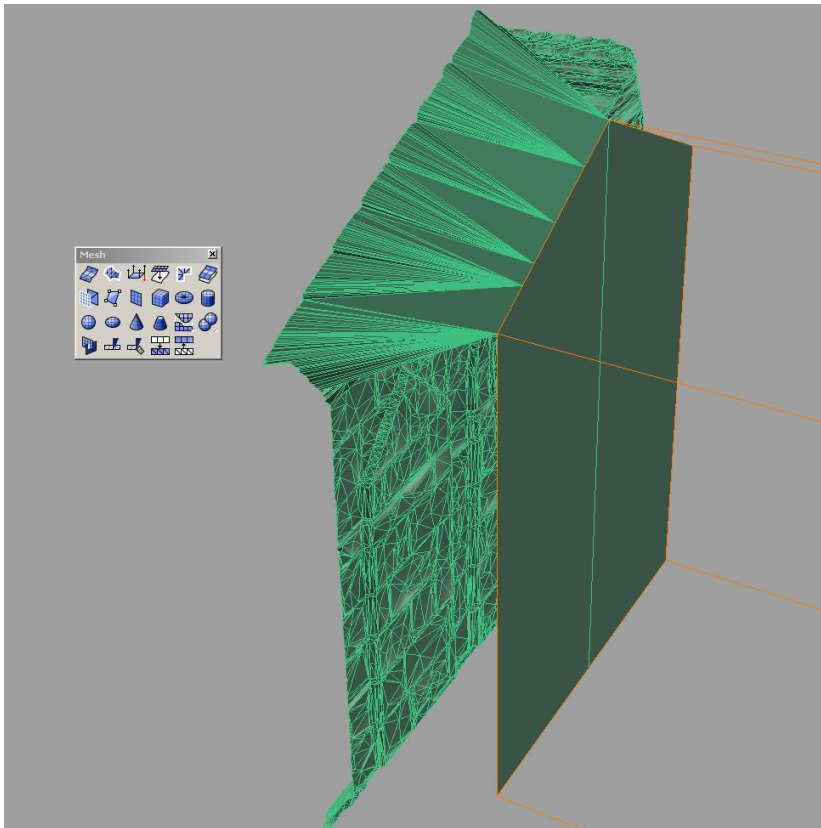


Fig. 115

De seguida liga-se a fachada principal à superfície interna. Visto a fachada principal ser irregular e a interna ser regular, os 'planos de fecho' são constituídos por triângulos. Durante este processo utilizam-se os comandos

Single Mesh Face  e *Add Mesh Face* .

A diferença entre estes dois comandos é o seguinte: o *Single Mesh Face* pode criar polígonos sem que existam ainda vértices ou arestas formados por outros polígonos.

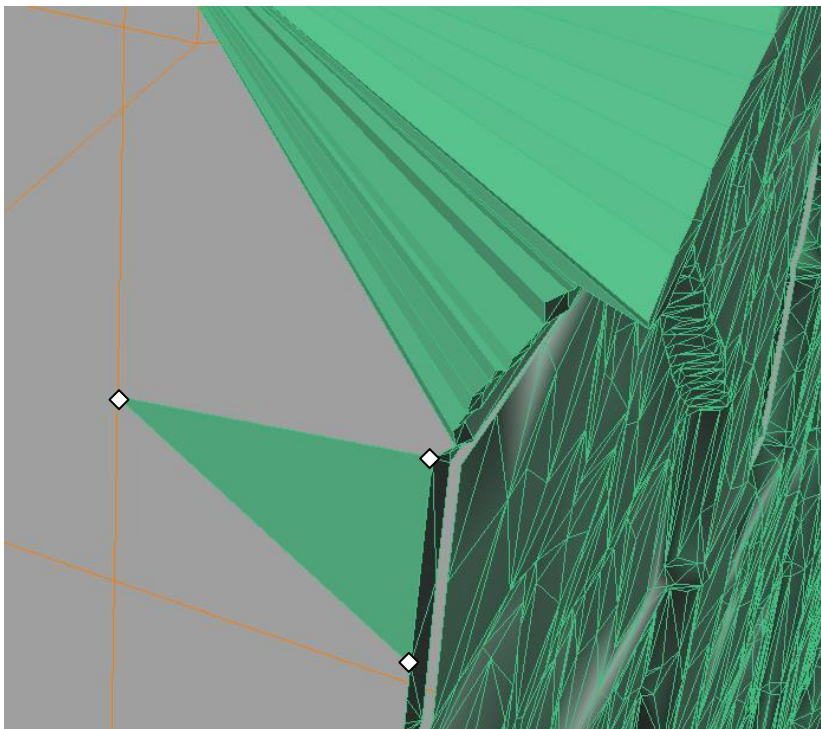


Fig. 116

Por fim fecha-se o 'troço de fachada' em todo o seu contorno.

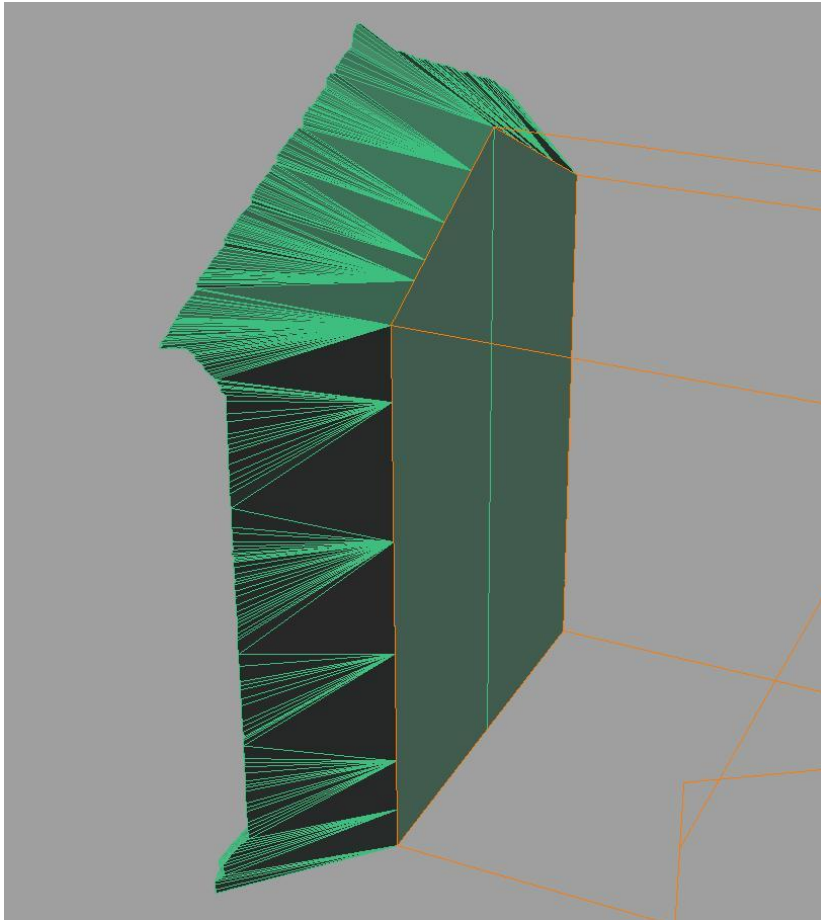


Fig. 117

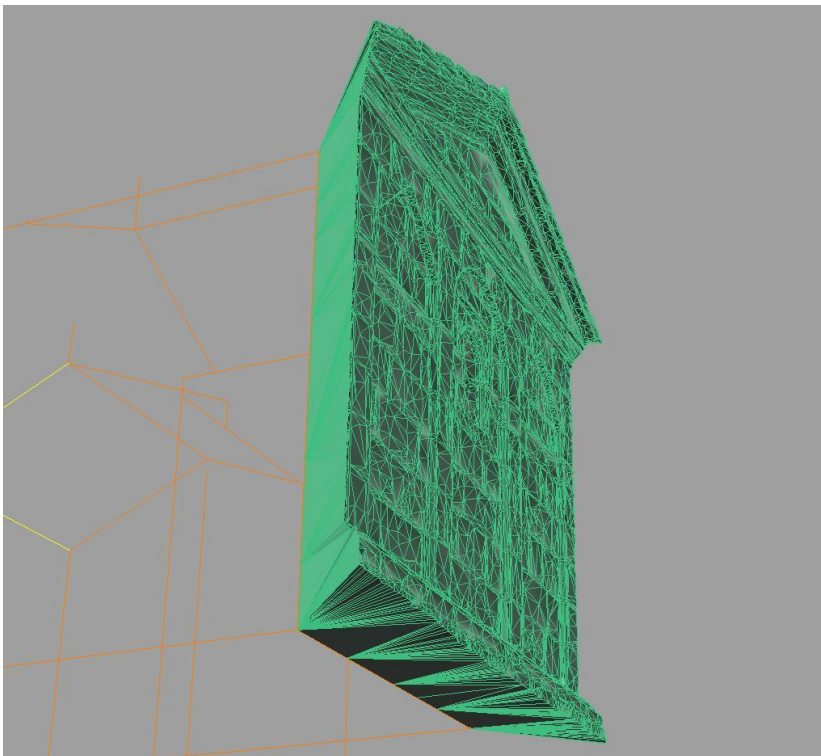


Fig. 118

O processo repete-se nas restantes malhas.

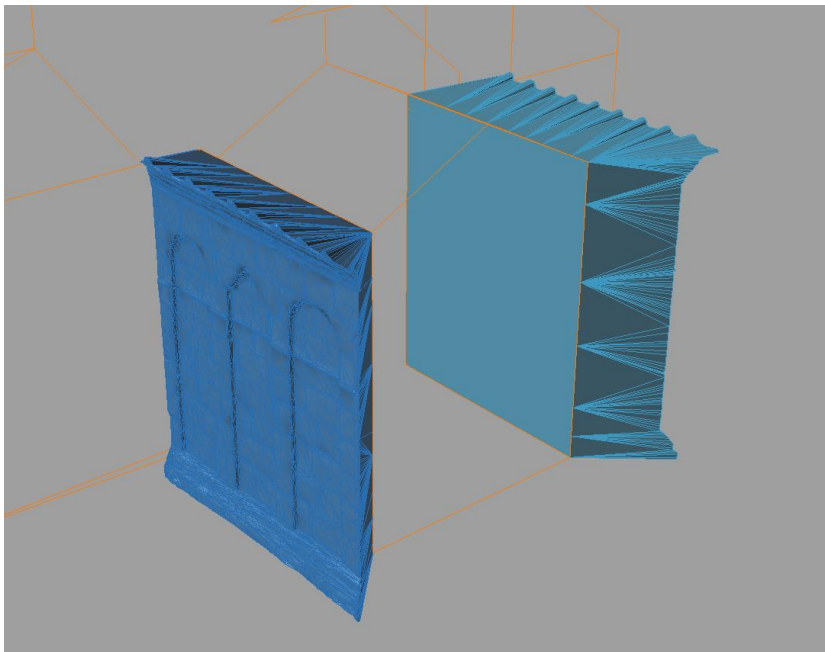


Fig. 119

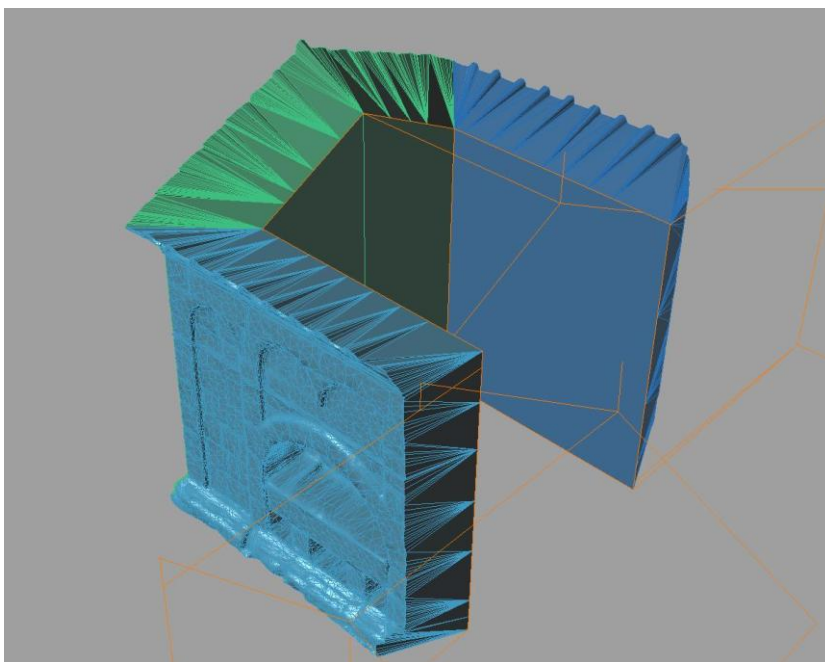


Fig. 120

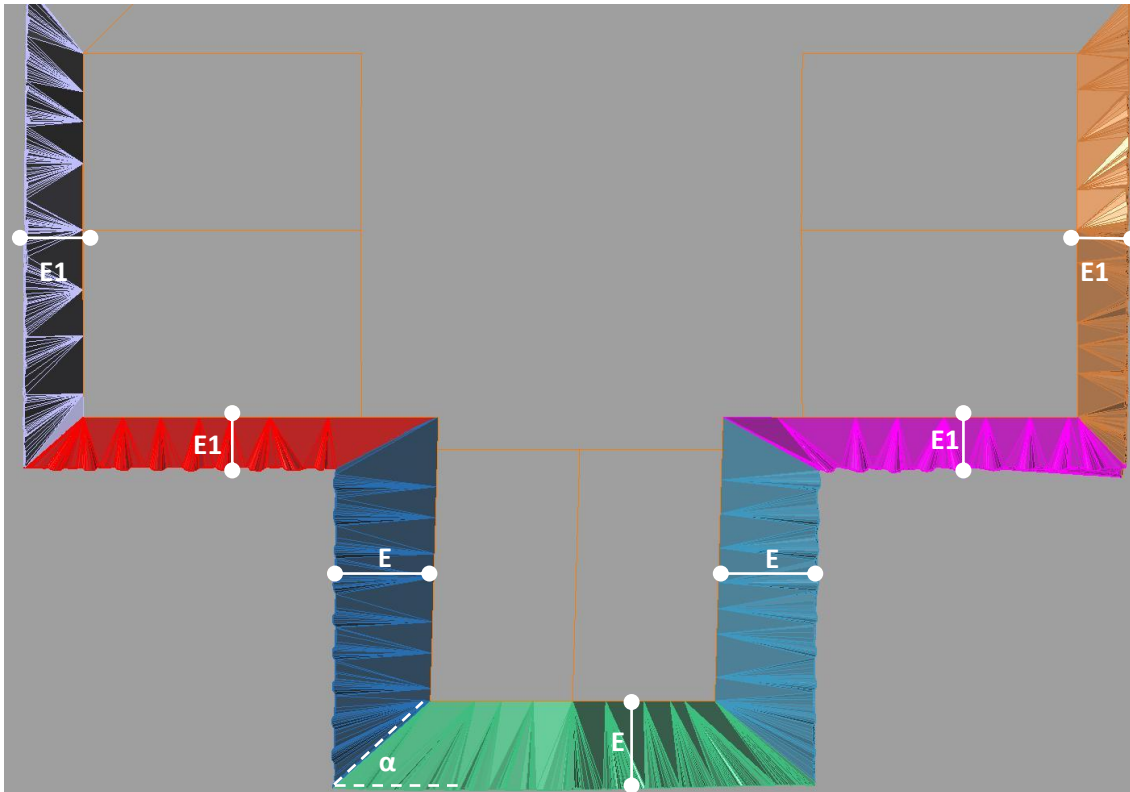


Fig. 121

Devido à espessura de cada troço de fachada, foi necessário fazer com que os planos onde os troços coincidem, fizessem um ângulo aproximado de 45°.

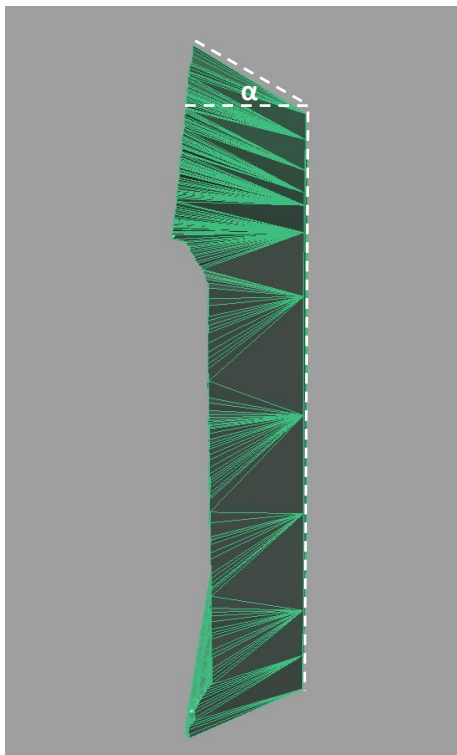
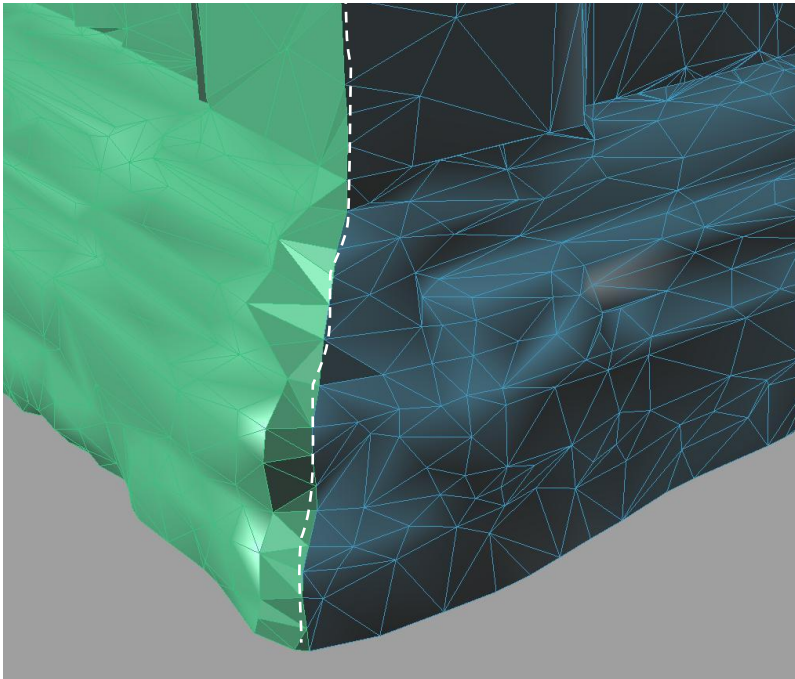
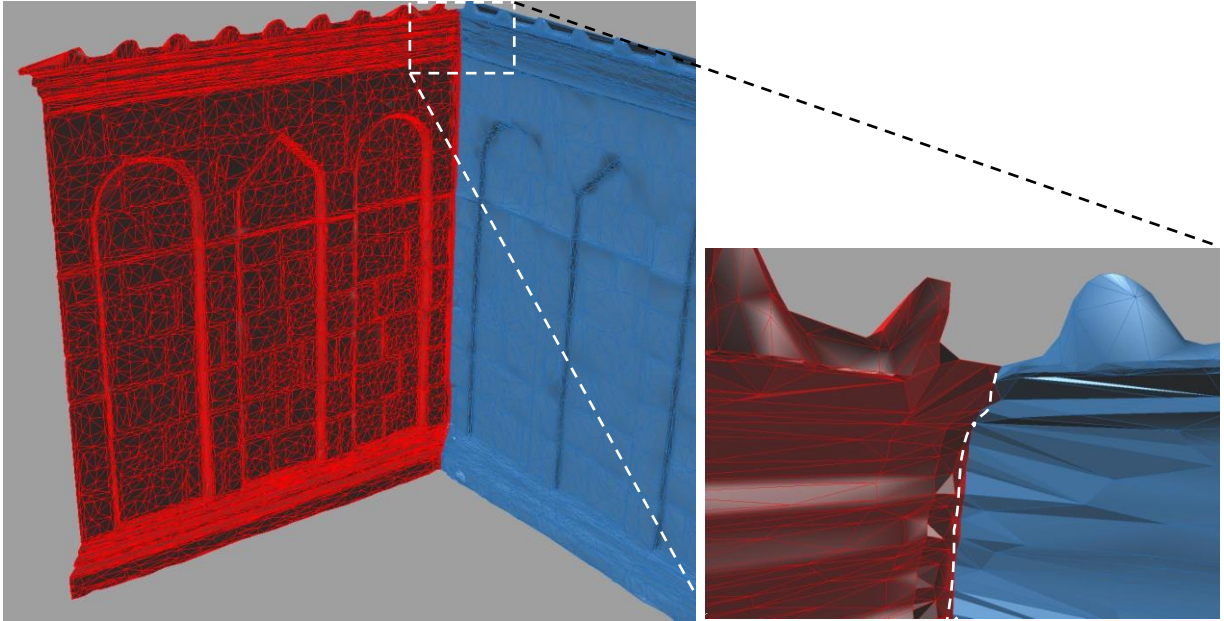


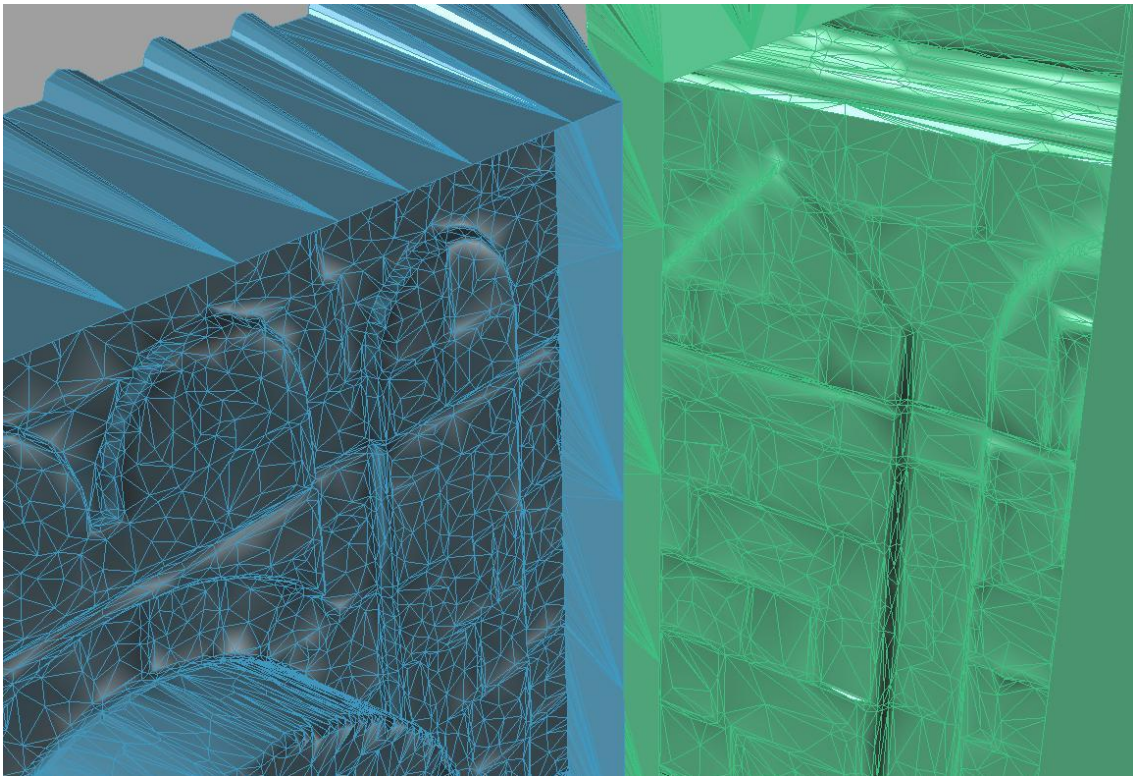
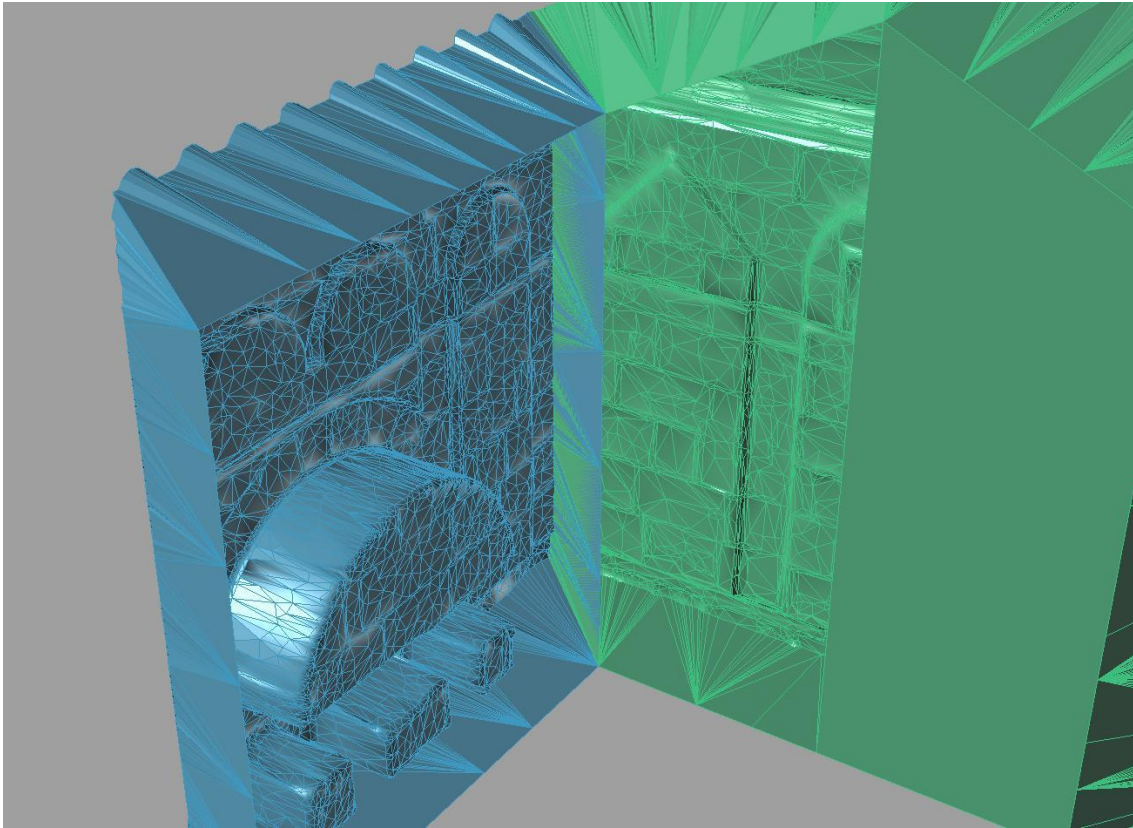
Fig. 122

Foi necessário também achar uma inclinação nos planos do Frontão, para que estes não intersectem os planos da cobertura (exemplo da cobertura mais adiante).



As margens de cada fachada devem estar totalmente coincidentes, polígono a polígono.

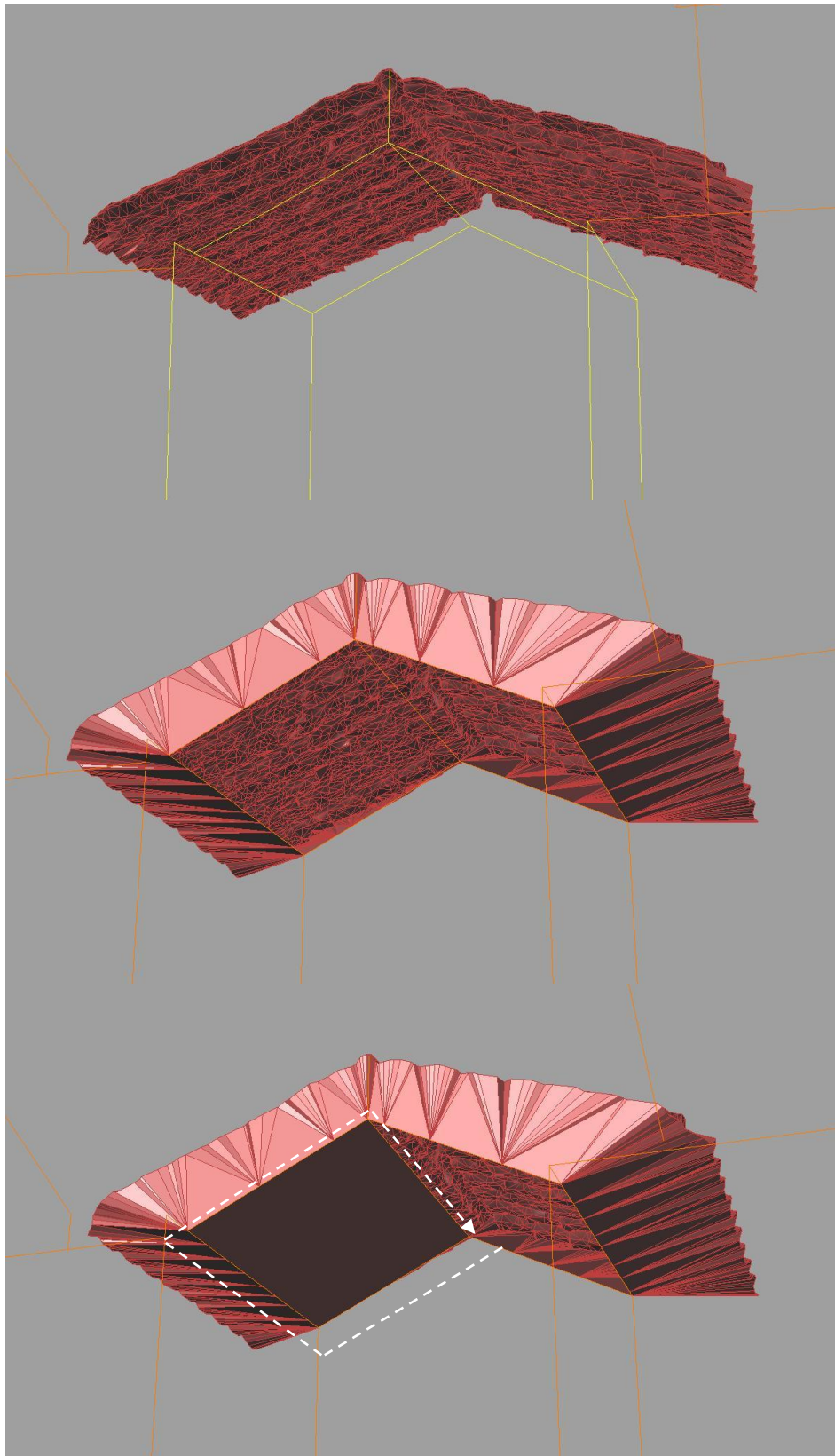
Fig. 123, 124, 125



As faces contíguas entre cada troço de fachada são iguais, de maneira a facilitar a construção do modelo depois de fabricado.

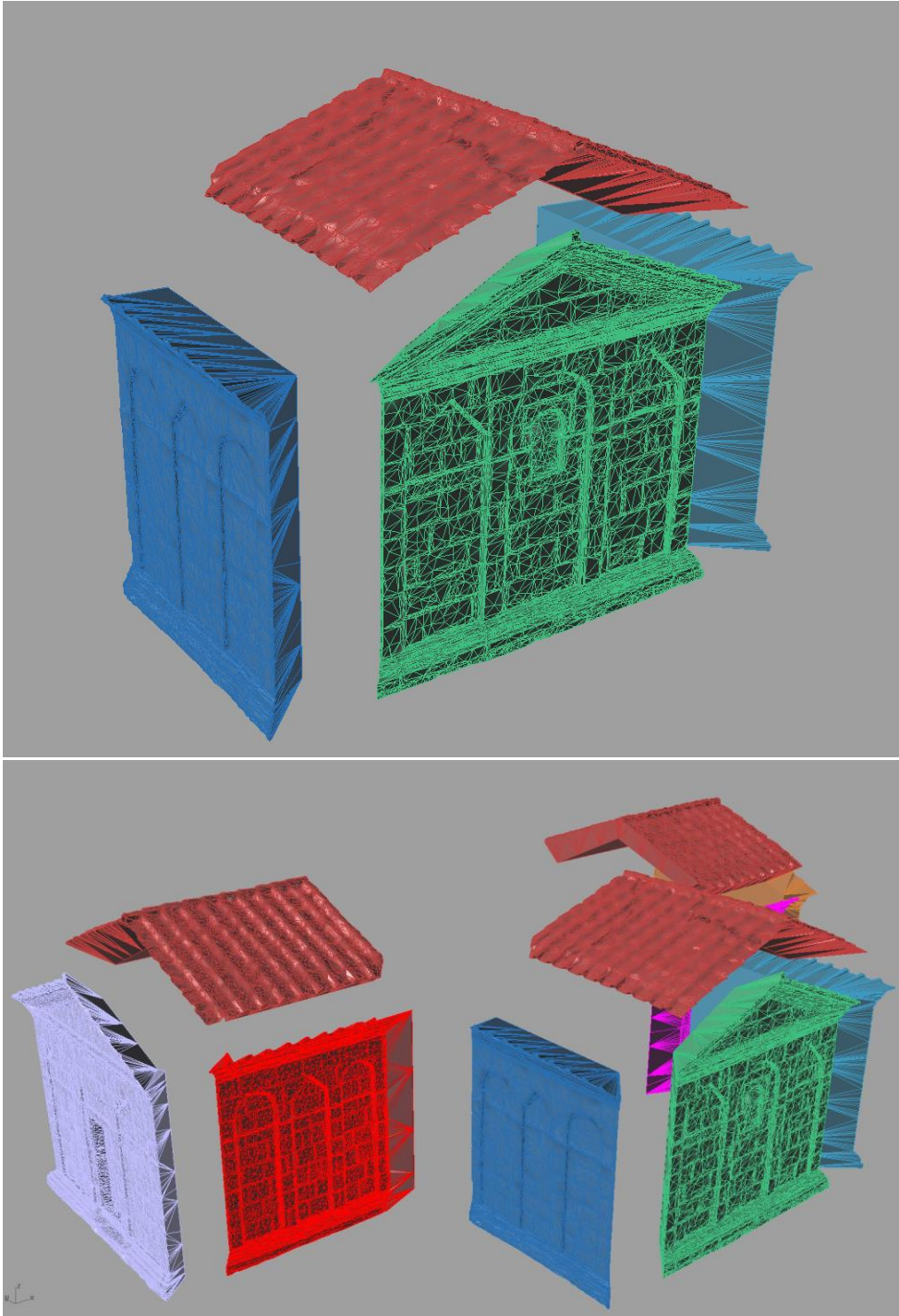
Fig. 126, 127

6.3. CONSTRUÇÃO DAS COBERTURAS



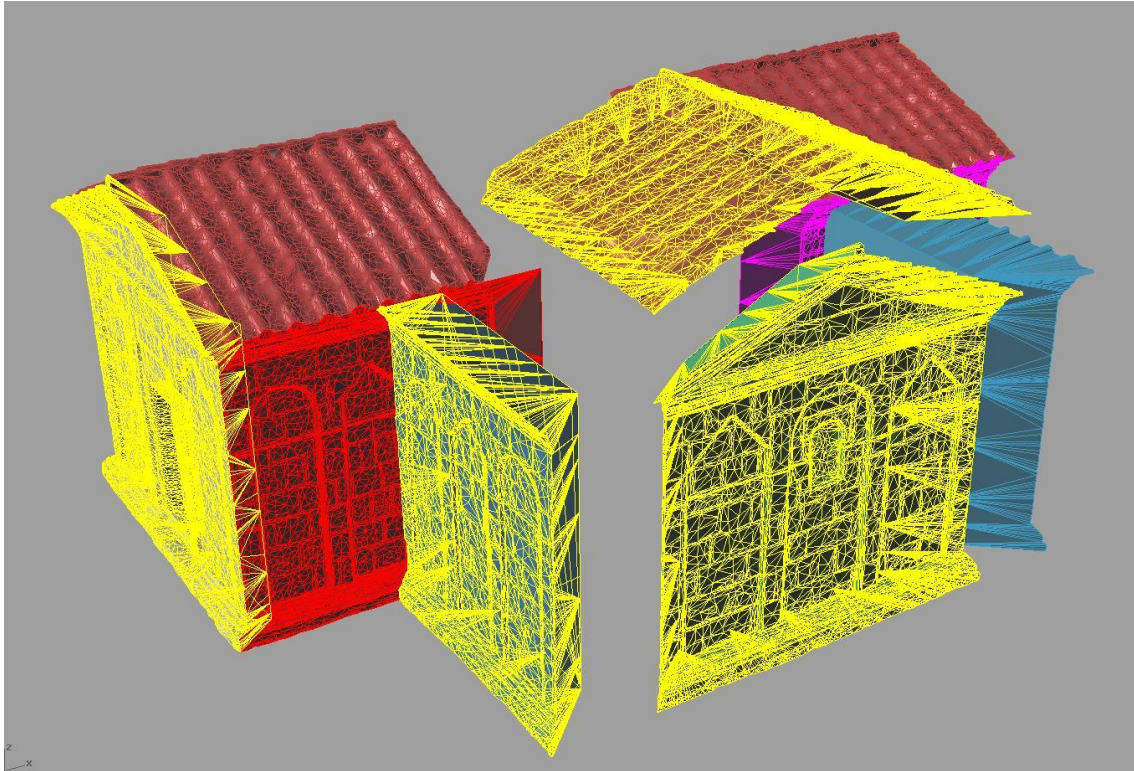
A construção das coberturas obedece ao mesmo critério descrito anteriormente, mas aqui em planos diferentes. Como se observa, tira-se partido da estrutura auxiliar para definir os planos que formam o objecto.

Fig. 128, 129, 130

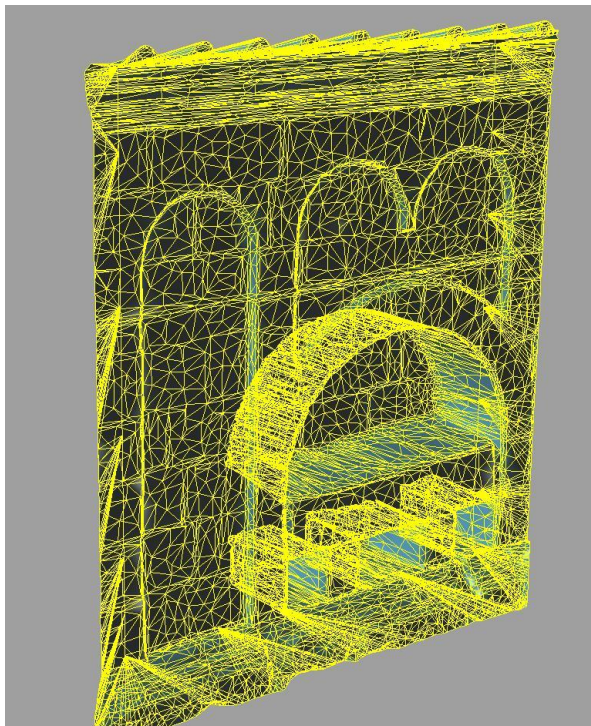


Aqui a imagem explodida dos 10 troços criados.

Fig. 131, 132



No fim da construção 3D, cada troço deve ser uma e uma só malha conjunta.




Como já foi explicado atrás, usando o botão 'Join' , reúnem-se todos os polígonos de cada troço numa malha única.

Fig. 133, 134

6.4. VERIFICAÇÃO DAS MALHAS E CONVERSÃO PARA FORMATO .STL

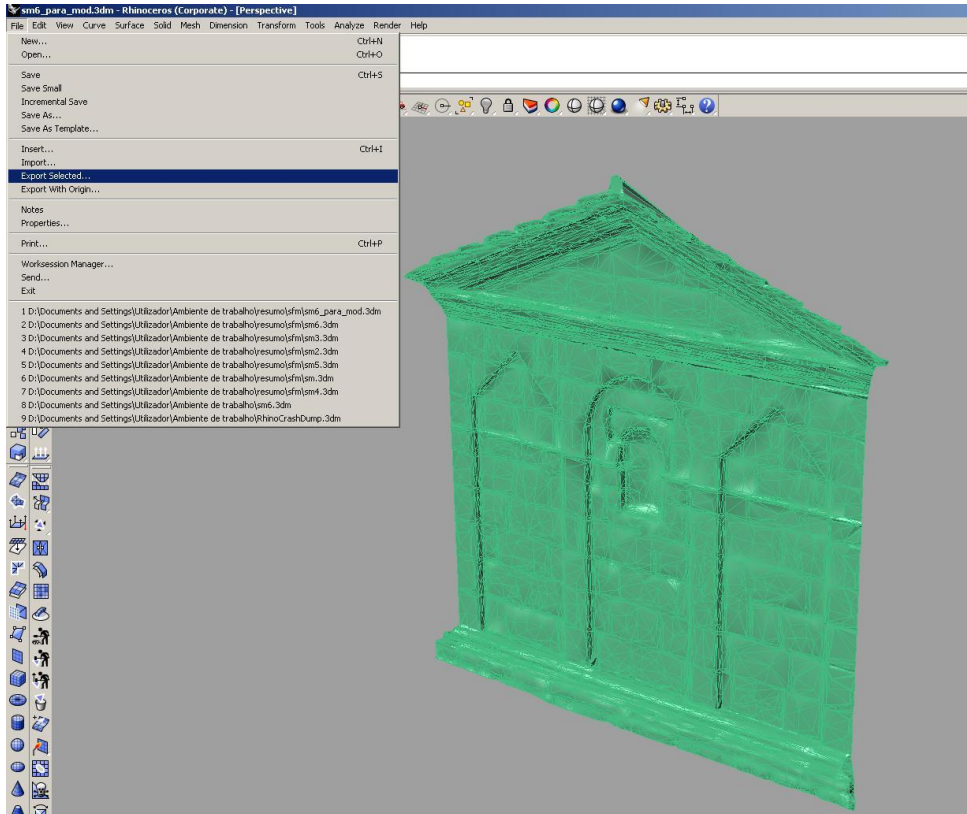
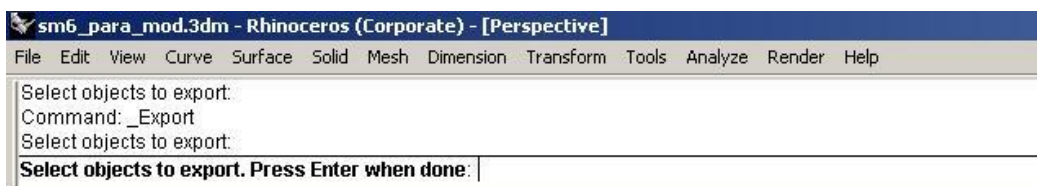


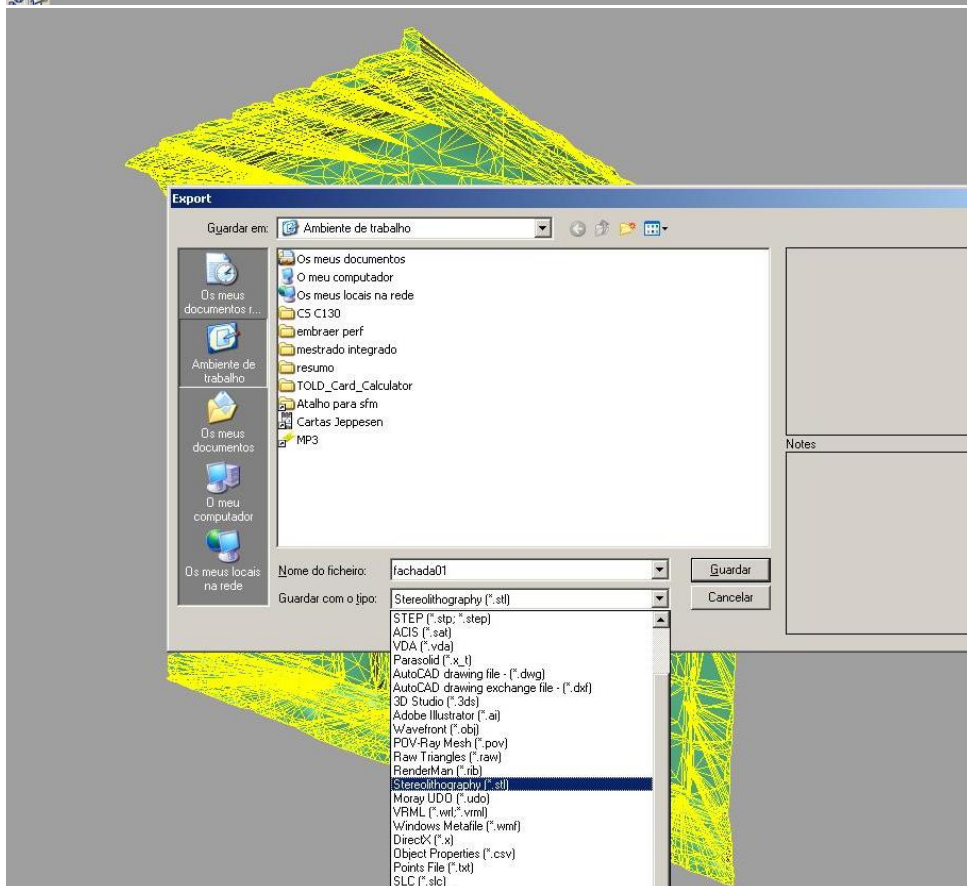
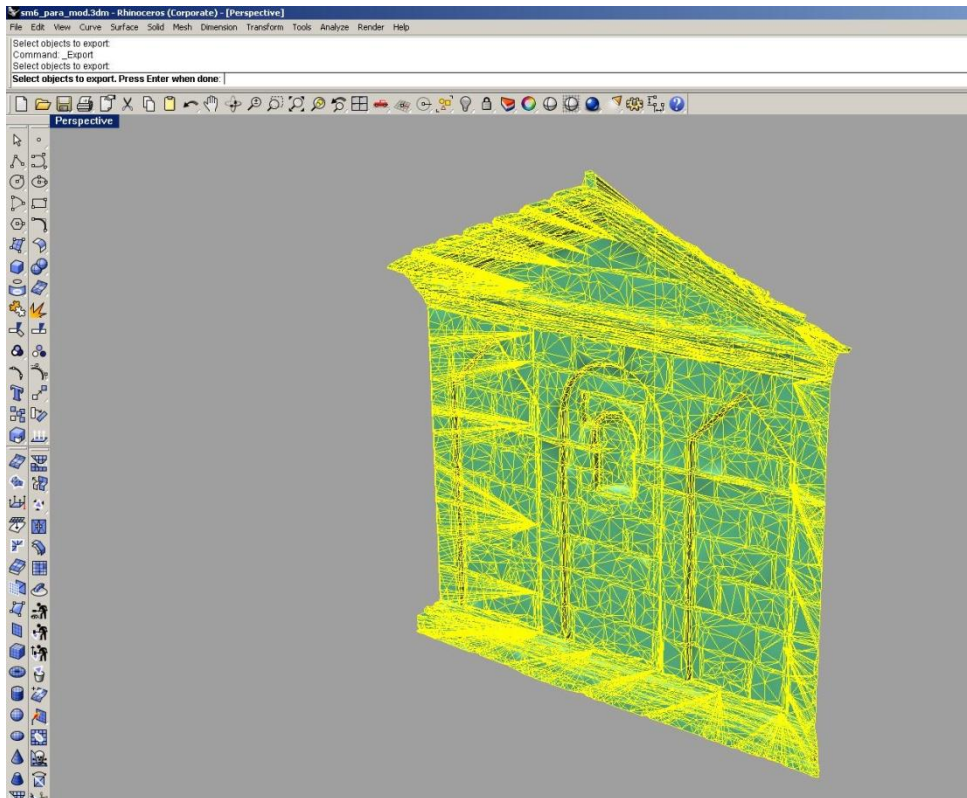
Fig. 135

Pegando num dos troços como exemplo, procede-se então à exportação para o formato pretendido *.STL* – *menu File → Export Selected*



A linha de comandos indica para se seleccionar o objecto e de seguida pressionar a tecla *Enter*.

Fig. 136



Depois de se carregar em *Enter*, aparece uma caixa onde se vai escolher o tipo de ficheiro .STL – dá-se o nome do ficheiro em cima (neste caso *'fachada01'*) e em baixo escolhe-se o tipo do ficheiro .STL
 Fig. 137, 138

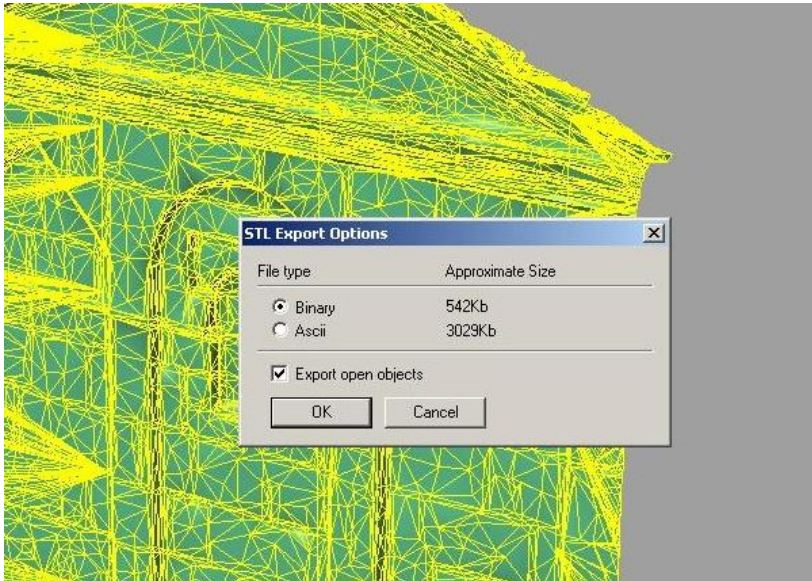


Fig. 139

Depois de se escolher a opção 'Guardar', aparece uma caixa de diálogo com informação a respeito da exportação para .STL; deixam-se as duas opções marcadas por defeito – 'Binary' e respectivo tamanho do ficheiro (542Kb) e 'Export open objects'.

Depois de se clicar em OK o ficheiro fica guardado com o formato .STL.

Pode-se escolher um directório para guardar o ficheiro. Neste exemplo ficou guardado no Ambiente de Trabalho.



Fig. 140

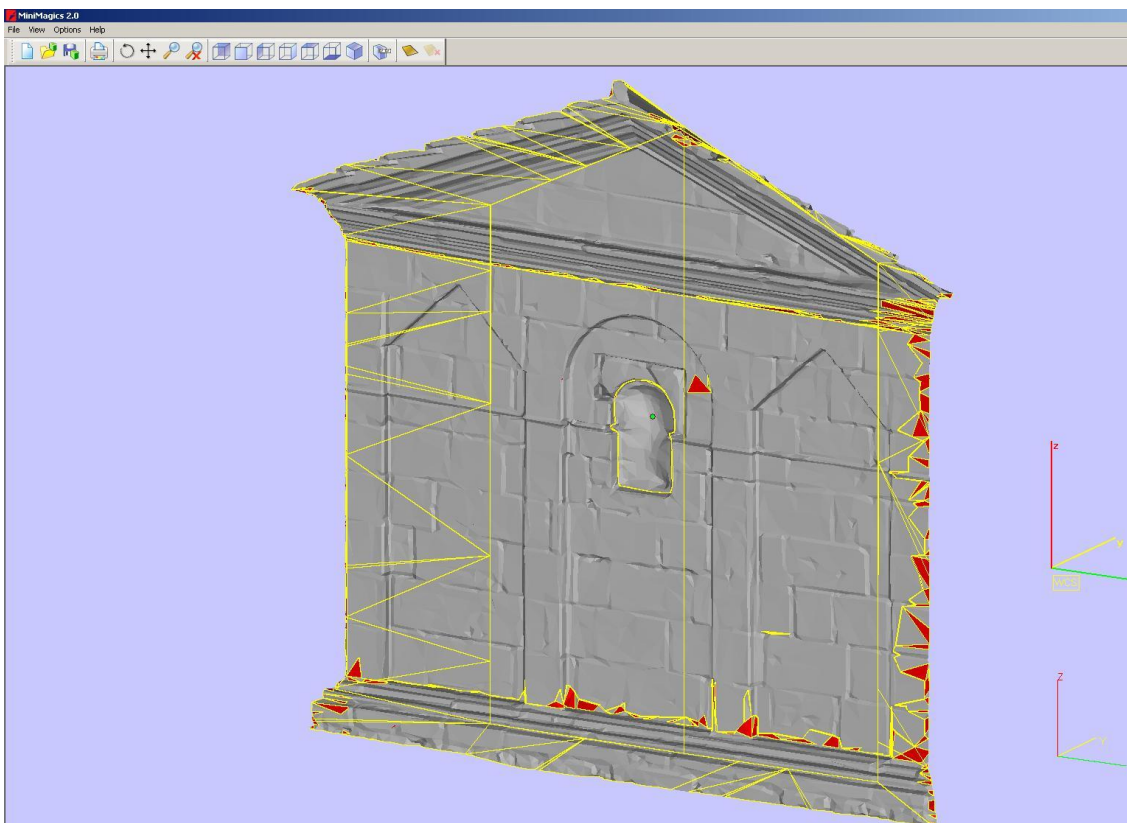
6.5. VISUALIZAÇÃO DO FICHEIRO COM O PROGRAMA *MINIMAGICS 2.0*[®]



Fig. 141

O programa *MiniMagics 2.0* é distribuído gratuitamente pela empresa *Materialise*[®] <http://www.materialise.com>

Este software permite apenas visualizar o modelo de maneira a verificar se existem erros, mas não permite a sua correcção.



Visualização do modelo no *MiniMagics 2.0* – as partes do modelo a vermelho, são erros que têm de ser corrigidos.

Fig. 142

Fig. 143

A faixa à direita apresenta toda a informação relativa ao modelo anterior.

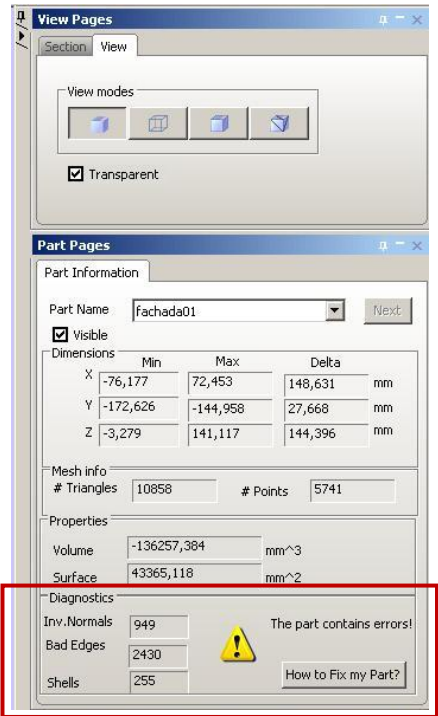
Existem quatro modos de visualização, escolha de transparência e opções para seccionar o modelo nos três eixos espaciais.

A meio, na informação de *Mesh*, estão apresentadas as dimensões em milímetros, o número de triângulos e o número de pontos.

Existe também informação de volume em mm^3 e área de superfície em mm^2 .

Logo abaixo aparece então a parte relativa ao diagnóstico, dando a informação dos erros que o modelo contém.

Neste exemplo observam-se 949 normais invertidas, 2430 arestas erradas e 255 *shells*.

A partir daqui existe a opção de tentar corrigir o modelo voltando ao programa *Rhinoceros*, ou clicando no botão 'How to Fix my Part?'.


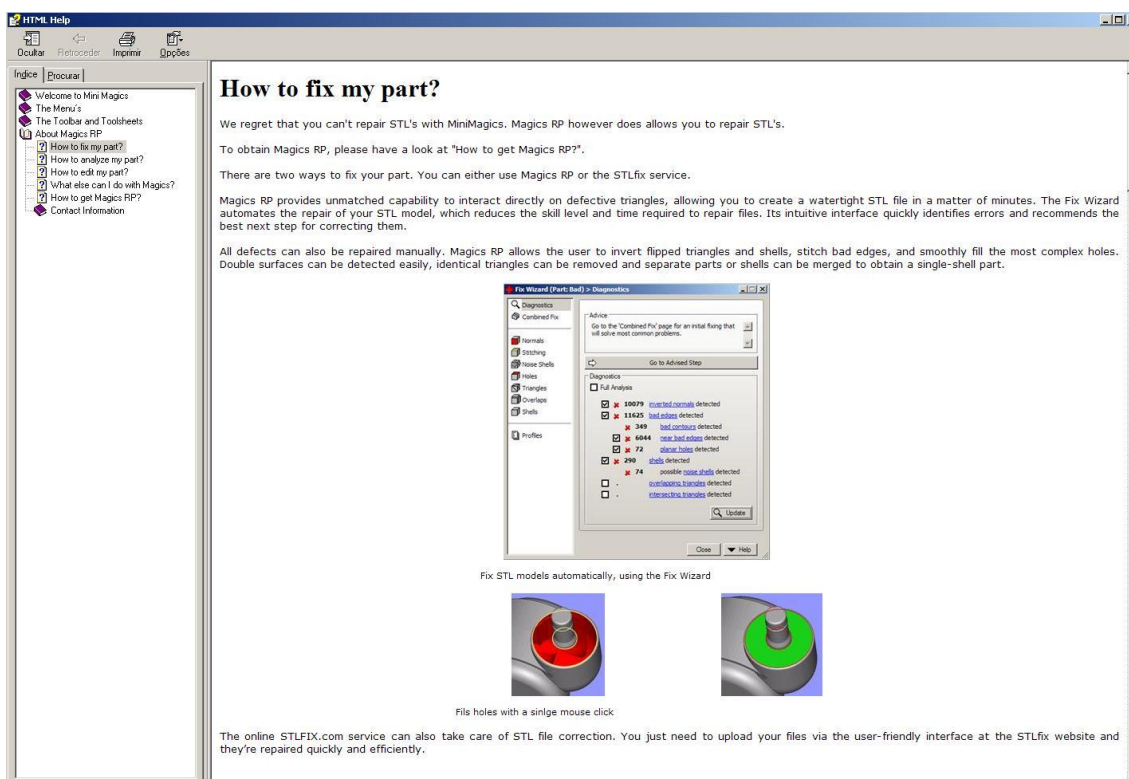


Fig. 144

Escolhendo a opção 'How to Fix my Part?', o programa remete para um tutorial e para a ferramenta de correção – o programa *MiniMagis-RP*, da mesma empresa.

A *Materialise*® fornece, contudo, uma ferramenta *on-line* gratuita para correção de erros pequenos – o *STLfix*.

Então o próximo passo será minimizar os erros do modelo e tentar a ferramenta *on-line*.

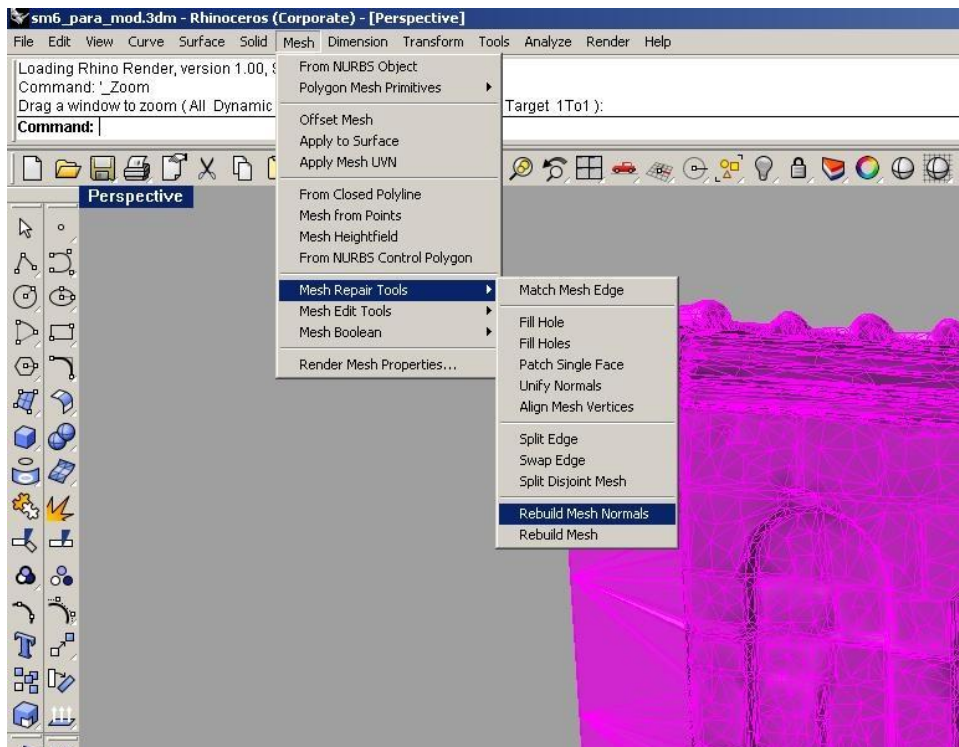


Fig. 145

Voltando ao *Rhinoceros 4.0* ir-se-á então tentar minimizar os erros.

Para tal escolhe-se a opção 'Rebuild Mesh Normals' no menu *Mesh* → *Mesh Repair Tools* → *Rebuild Mesh Normals*.

De seguida no mesmo menu escolhe-se a opção 'Unify Normals'.

Grava-se o ficheiro e volta-se a exportar para o formato .STL para ver o resultado no *MiniMagics 2.0*.

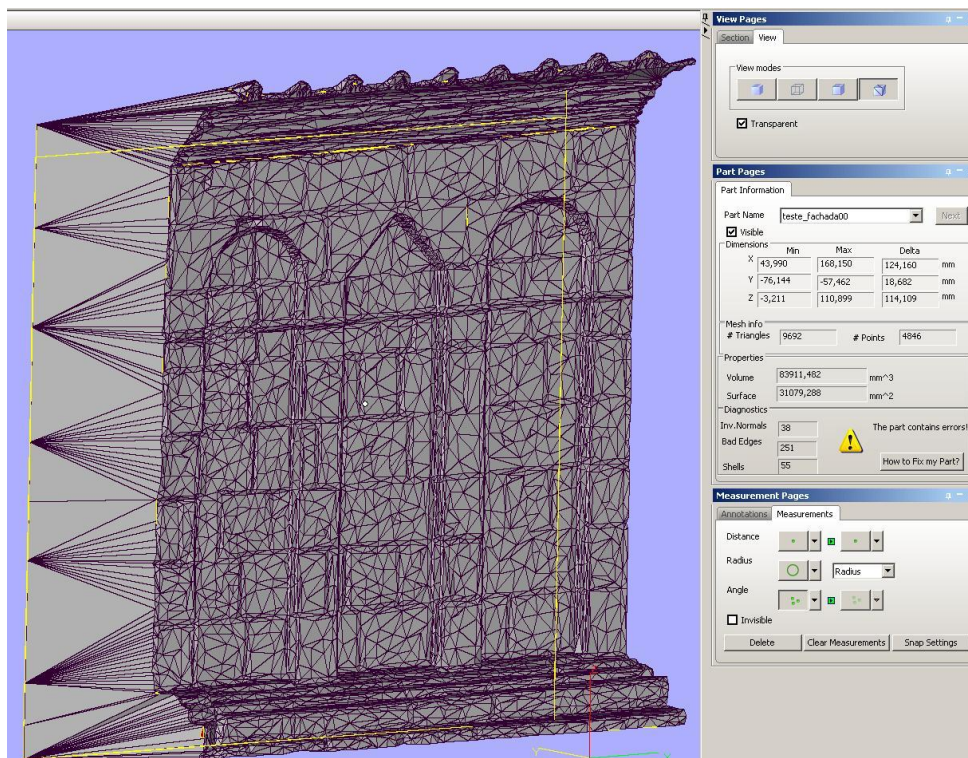


Fig. 146

Neste exemplo os erros foram minimizados, mas ainda continuam a existir erros.

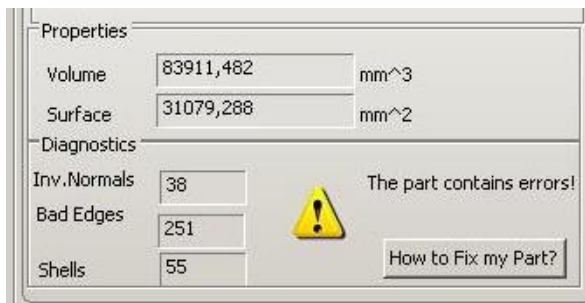


Fig. 147

Como se pode verificar ainda existem 38 normais invertidas, 251 arestas erradas e 55 *Shells*.

A partir daqui tentou-se minimizar ainda mais os erros, ou eliminá-los por completo através do *Rhinceros*, mas sem resultado. As operações tornaram-se em tentativa e erro, apresentando por vezes até resultados piores, como no exemplo abaixo.

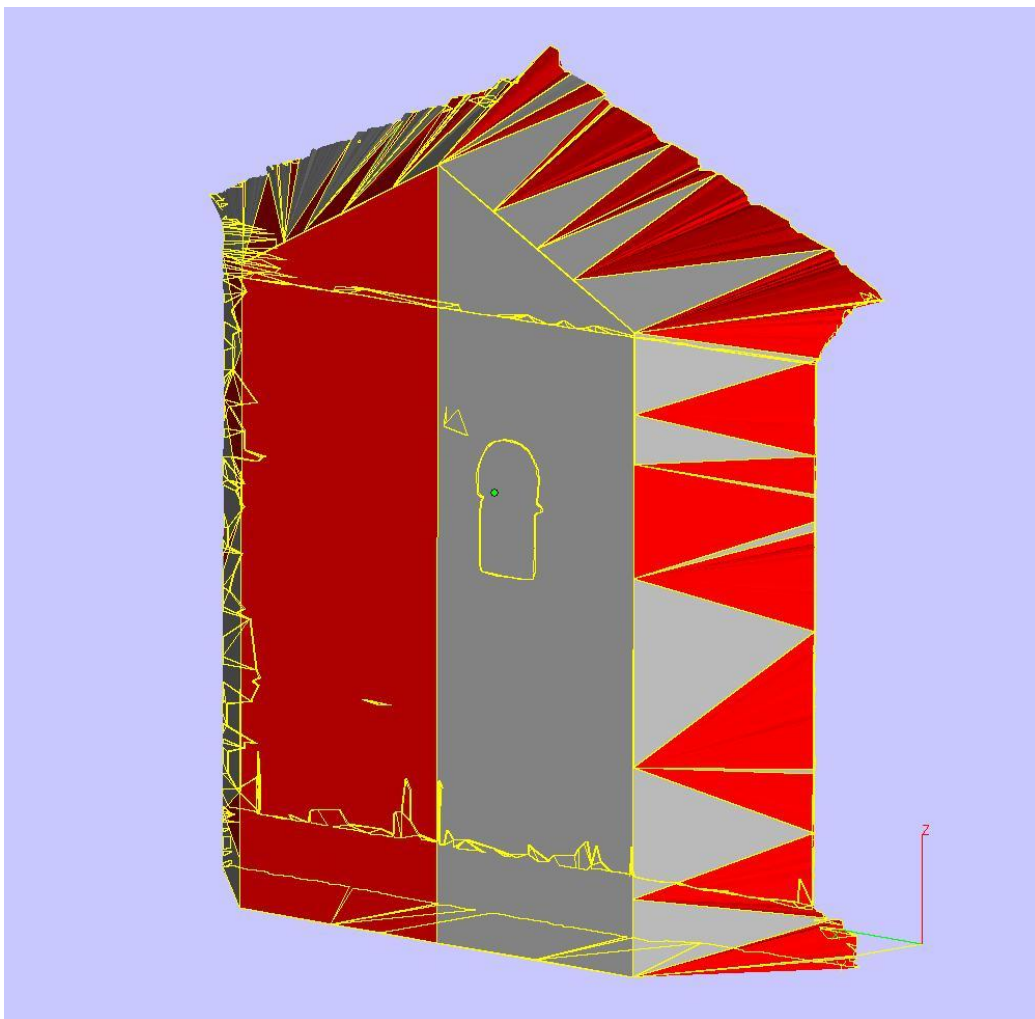


Fig. 148

6.6. STLFIX – CORRECÇÃO ON-LINE AUTOMÁTICA DOS MODELOS



Mediante registo no site <http://www.stlfix.com> o utilizador pode remeter os seus projectos 3D, para que o serviço automático os corrija.

Se o projecto for muito complexo ou o serviço automático não conseguir corrigir os erros é necessário pagar o serviço, ou adquirir o programa *MiniMagics-RP*®.

Fig. 149, 150

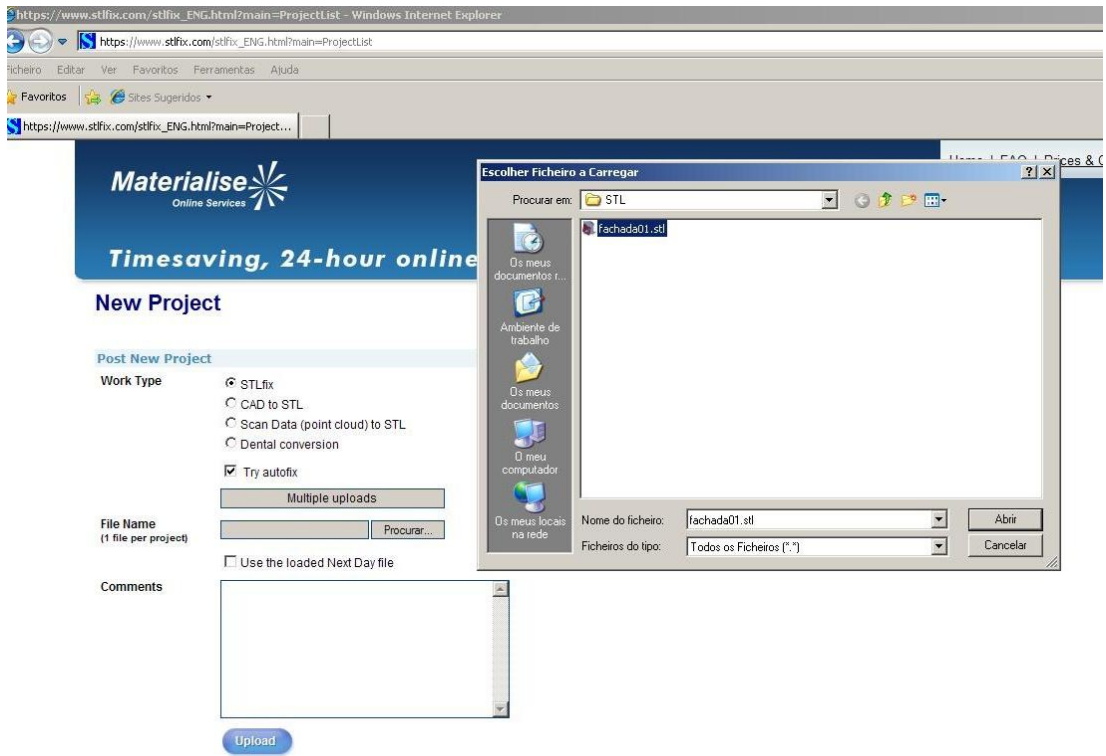


Fig. 151

Depois de se escolher o ficheiro faz-se o *Upload* carregando no respectivo botão.





Project List

From: None | To: None |

Records on page:

Status:

Project ID:

Project ID <small>(press link for details)</small>	Project File Name	Start Date	Due Date	Status	Cost (EURO)	Feedback
75985	75985_posted_teste_fachada00.stl	14/09/2010 14:09:14		FINISHED	0	
75984	75984_posted_fachada_0401.stl	14/09/2010 14:05:24		FINISHED	0	
75983	75983_posted_teste_fachada04.stl	14/09/2010 13:15:10		FINISHED	0	
75937	75937_posted_teste_cobertura01.stl	13/09/2010 13:45:09		POSTED NEW!!!		
75891	75891_posted_teste_cobertura01.stl	11/09/2010 15:06:12		FINISHED	0	
75890	75890_posted_teste_fachada02.stl	11/09/2010 14:43:00		FINISHED	0	
75889	75889_posted_teste_fachada04.stl	11/09/2010 14:41:14		FINISHED	0	
75830	75830_posted_teste_fachada03.stl	09/09/2010 16:56:01		FINISHED	0	
75686	75686_posted_teste.stl	06/09/2010 21:25:45		FINISHED	0	


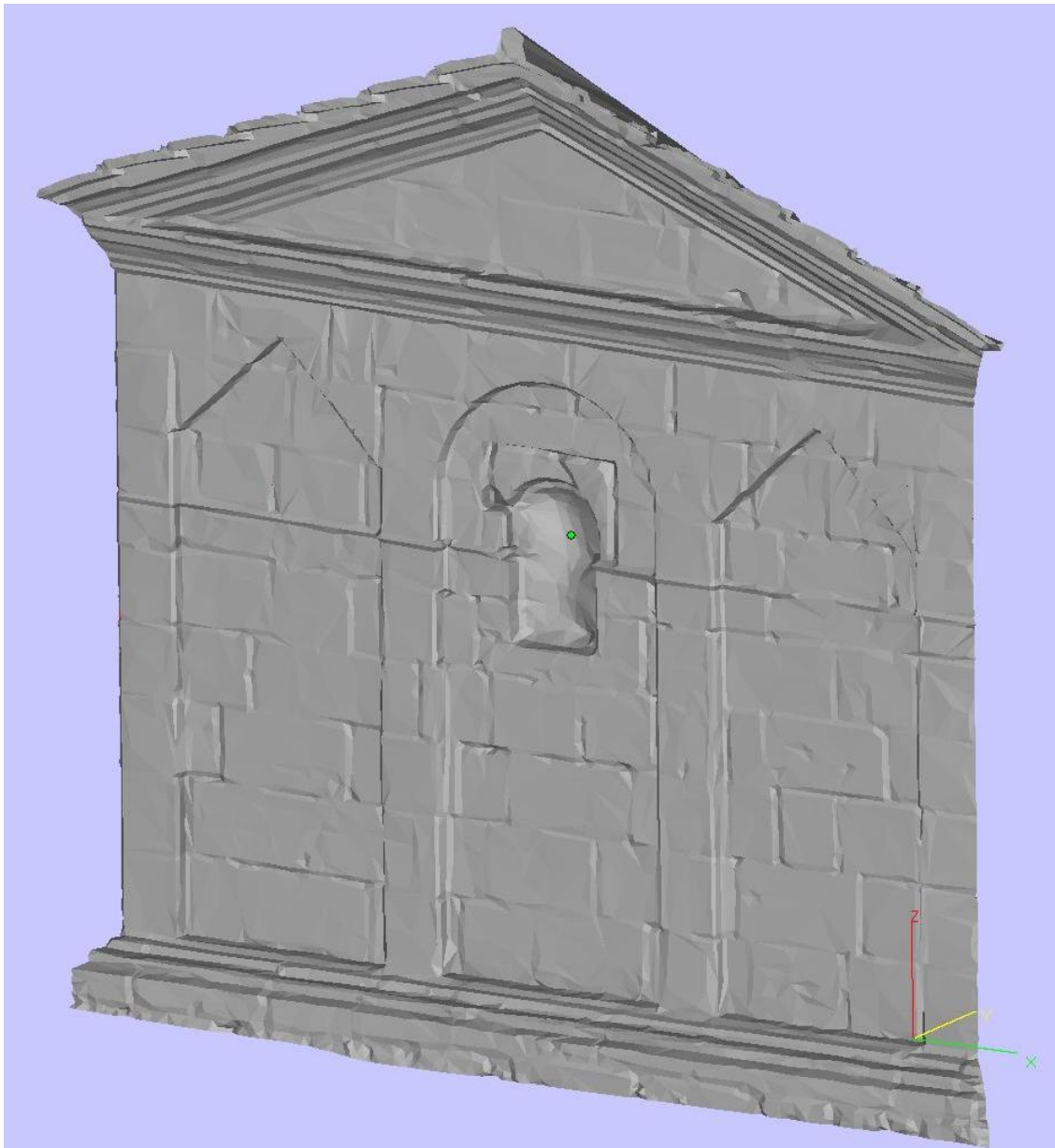
 Our OnLine Service team constantly strives to improve the quality of the service provided to our customers. We are always happy to receive a feedback from you, so if you see any way we could make our service even a tiny bit better, please let us know your suggestion by writing at and we will surely pay a close heed to it. Thank you for helping us perfect our service!

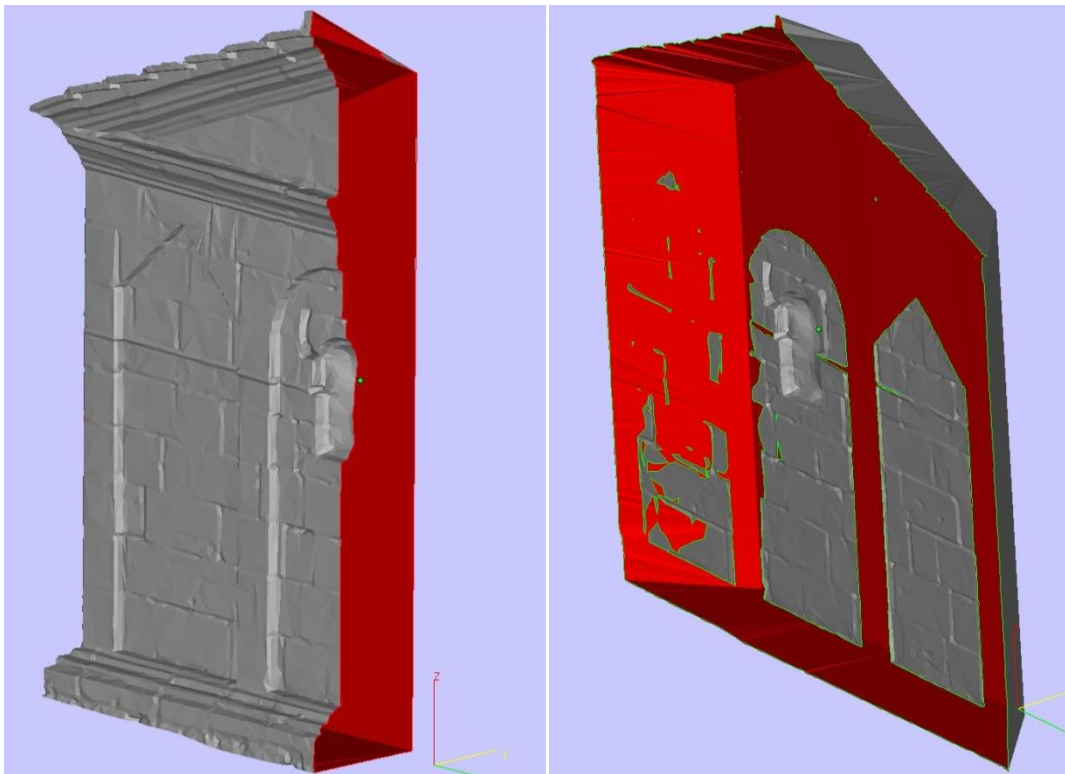
Fig. 152

Os projetos carregados ficam arquivados e em espera até serem corrigidos.



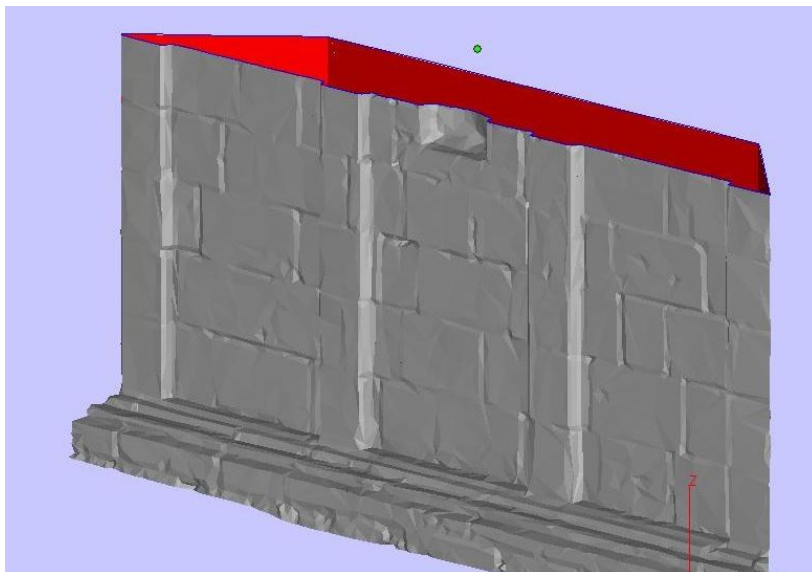
Depois de corrigidos, os ficheiros são enviados por email ou disponibilizados na lista de projectos do utilizador.

Fig. 153, 154



corte na direcção do eixo X;

direcção do eixo Y;



direcção do eixo Z

Fig. 155, 156, 157

Video Multimédia “Do Real ao Protótipo”

[<http://www.youtube.com/watch?v=w2waYpWLRg>](http://www.youtube.com/watch?v=w2waYpWLRg)

7. PRODUÇÃO DAS PEÇAS ATRAVÉS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Depois de se terem corrigidos os erros nos ficheiros .STL é necessário gerar um código que comunica com a máquina de fabricação.

O software que gera o código e age como interface entre o software e o hardware é o *Skeinforge*.

Este software é *open-source*, ou seja, é distribuído gratuitamente através da internet e passível de ser melhorado ou explorado por quem o utiliza.

O *Skeinforge* está disponível em <http://fabmetheus.crsndoo.com/>

Para instalar o *Skeinforge* são necessários outros dois programas – o *Python 2.X* e o *Psycho 1.6* disponíveis respectivamente aqui <http://www.python.org/download/> e aqui <http://psyco.sourceforge.net/download.html>

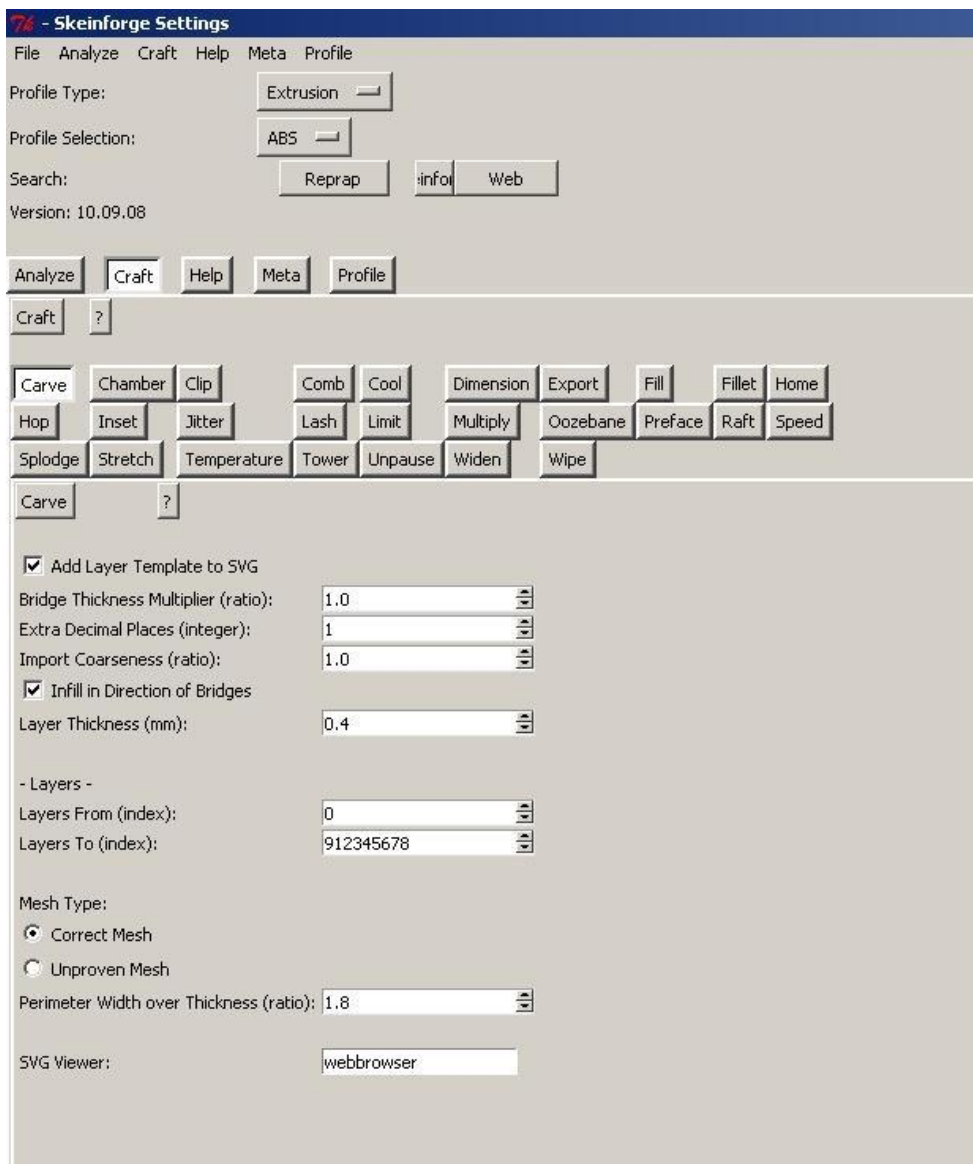


Fig. 158

Interface gráfica do *Skeinforge*, onde entre muitas opções, se vai escolher o tipo de perfil da fabricação e o tipo de material.

7.1. O 'Makerbot'

O *Makerbot* é a máquina que irá fabricar as peças.

Como a indústria das impressoras 3D ainda não é acessível a qualquer pessoa, o *Makerbot* é a melhor opção preço/qualidade.

O *Makerbot* é vendido em partes e o utilizador vai montando a máquina de acordo com as suas preferências e necessidades.

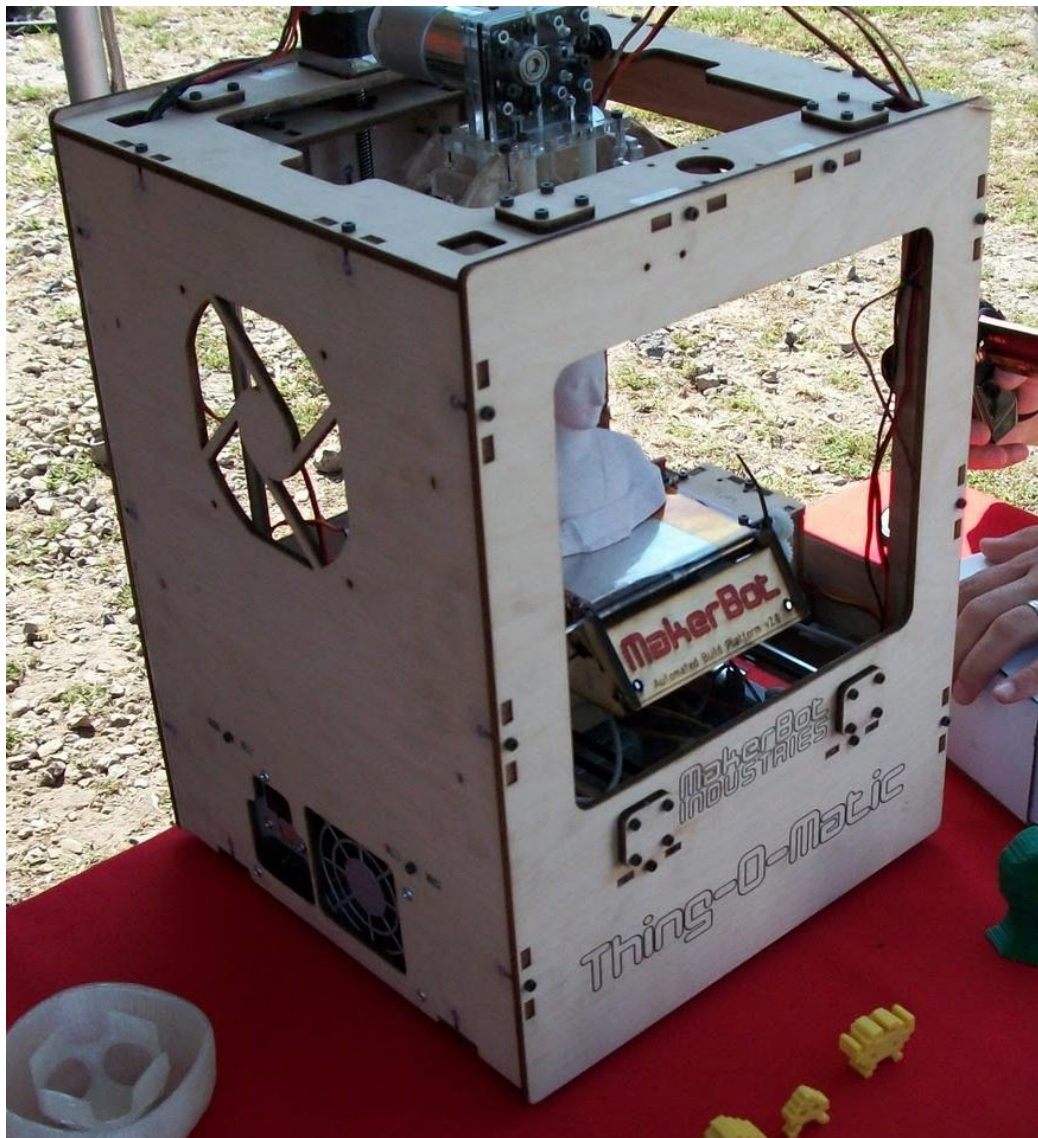


Fig. 159

imagem retirada do *blog do Makerbot* <http://blog.makerbot.com/>

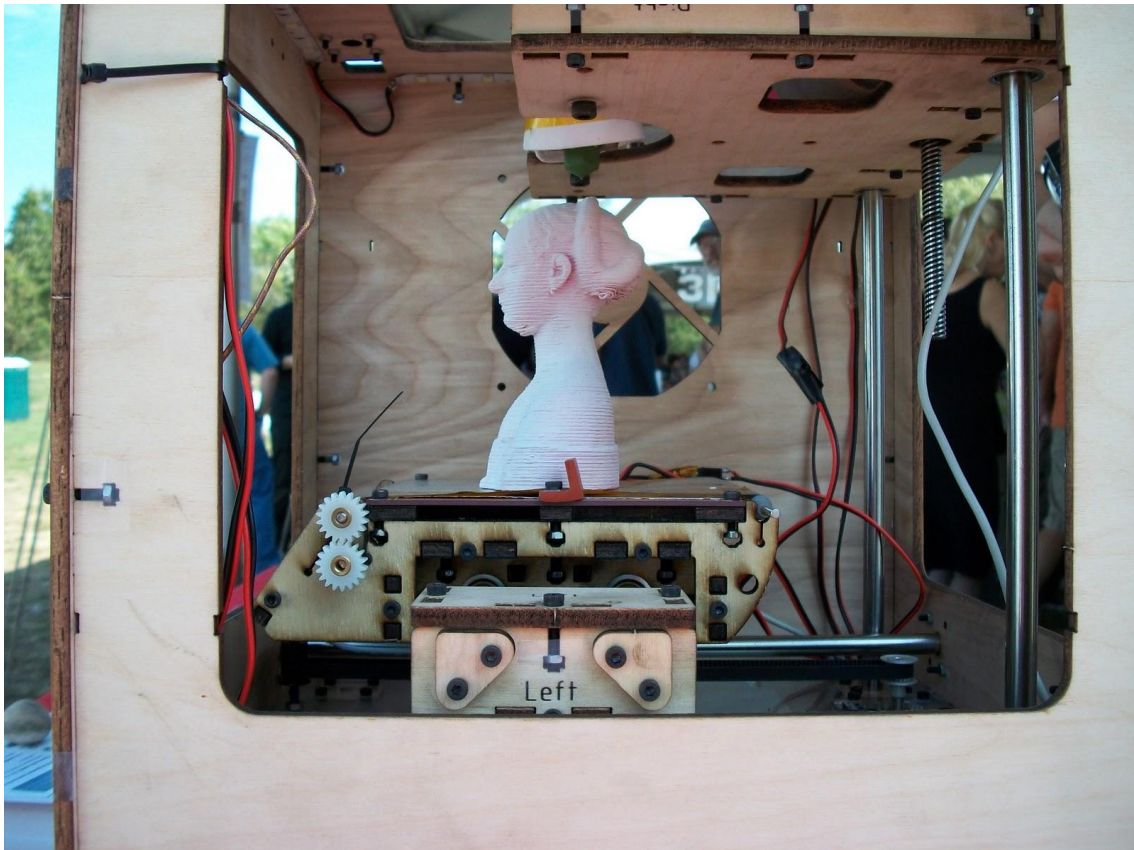


Fig. 160

imagem retirada do *blog do Makerbot* <http://blog.makerbot.com/>

Especificações técnicas do *Makerbot*:

- *Interface: Print through USB or print from SD card*
- *Size: 300 x 300 x 410 mm (12" W x 12" D x 16" H)*
- *Build Area: 96 x 108 mm*
- *Build Height: 115 mm*
- *Generation 4 Electronics*
 - *Supports up to 5 stepper drivers (XYZ + A/B)*
 - *Connect over USB (no more FTDI cable)*
 - *Optional LCD interface support (Not included)*
 - *Full mechanical endstop support*
 - *High current mosfets to drive heated build platform and extruder heater*
 - *Thermocouple support for more accurate temperature sensing*
- *Standard ATX power supply*
- *Works with both 110v and 220v power*
- *Theoretical XY Positioning resolution of 0.02mm (20 microns or 0.0008")*
- *Theoretical XY Maximum Feedrate of up to 5000mm/minute (roughly 200 IPM)*
- *Theoretical Z Positioning resolution of 0.005mm (5 microns / or 0.0002")*
- *Theoretical Z Positioning Feedrate of up to 1000mm/minutes (roughly 40 IPM)*
- *Capable of printing with ABS and PLA*

in <http://blog.makerbot.com/>

Imagens do *Makerbot* da Faculdade de Arquitectura da U.T.L.

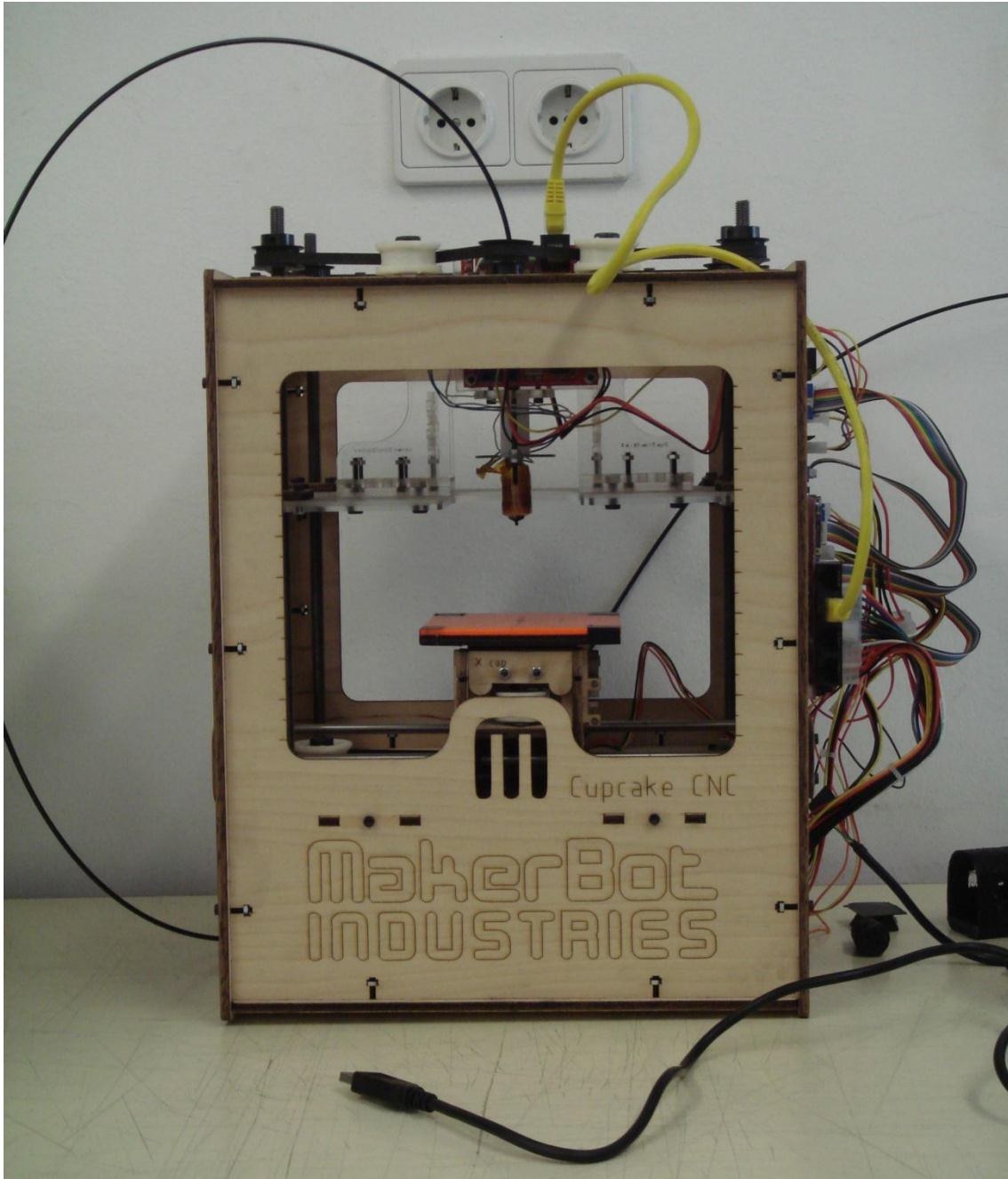


Fig. 161

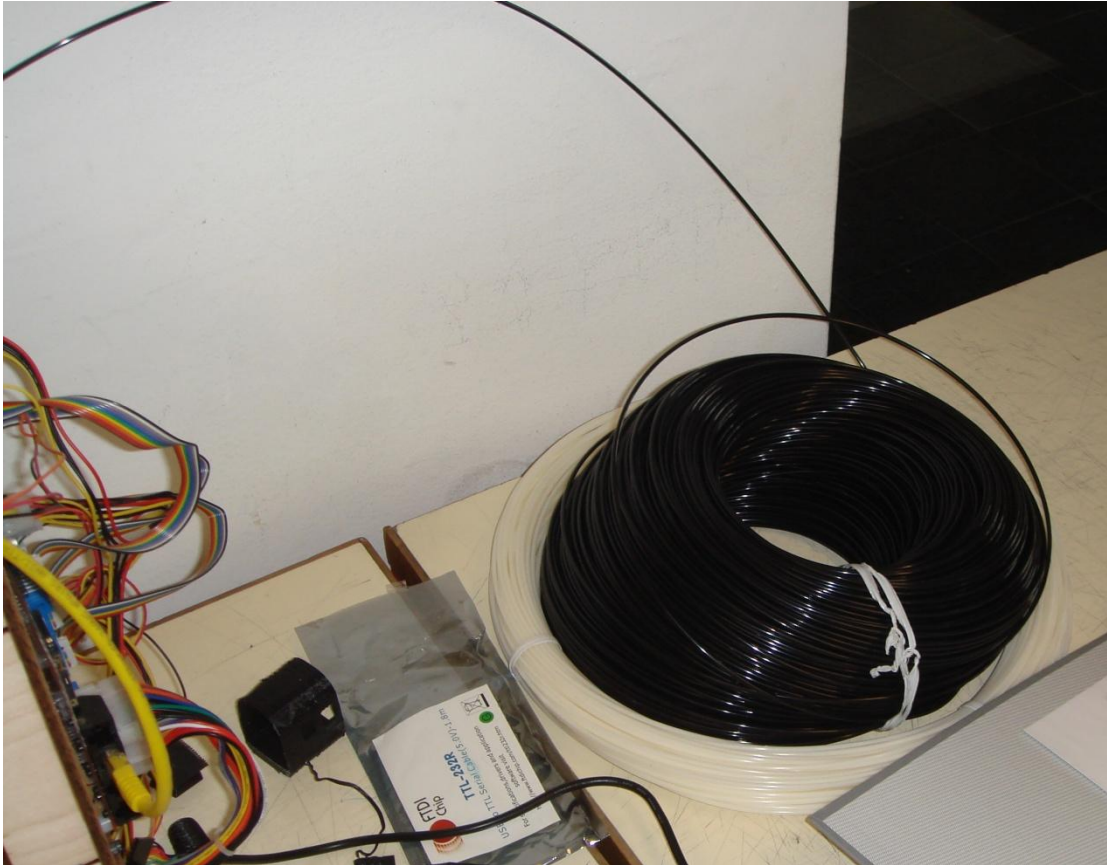


Fig. 162 – Faixas de polímero para a fabricação

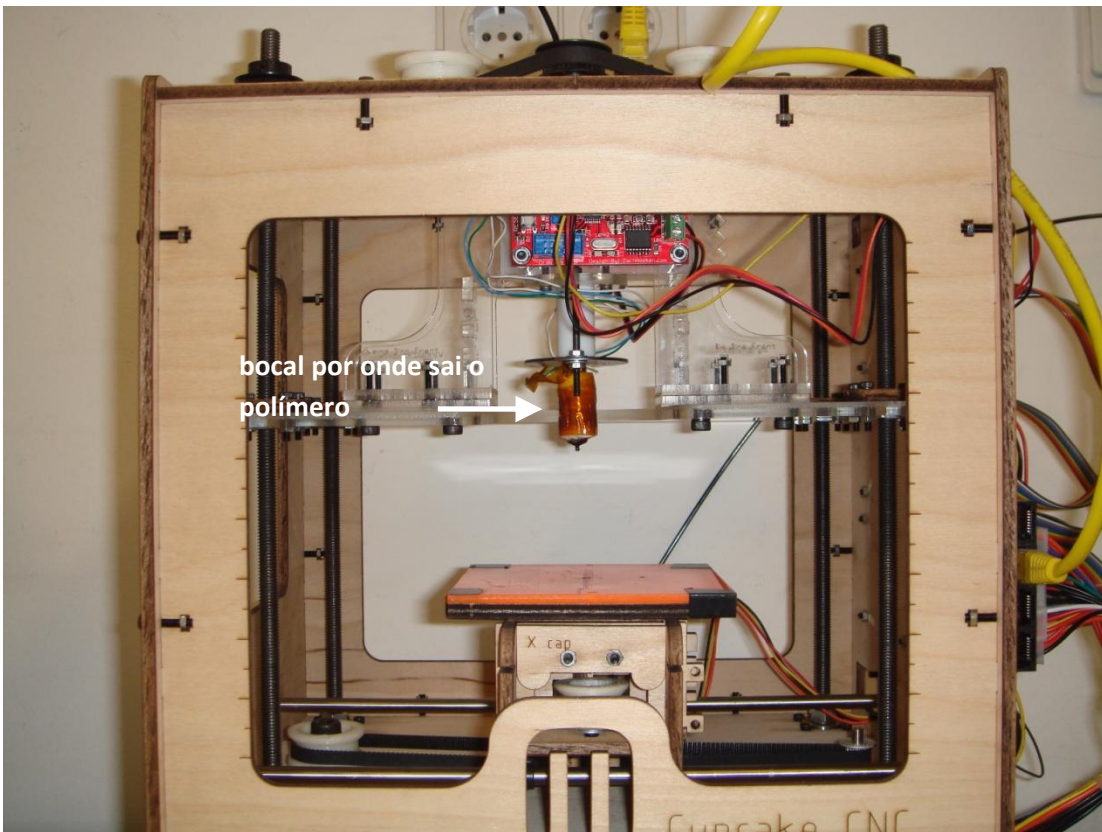


Fig. 163 – A câmara de fabricação

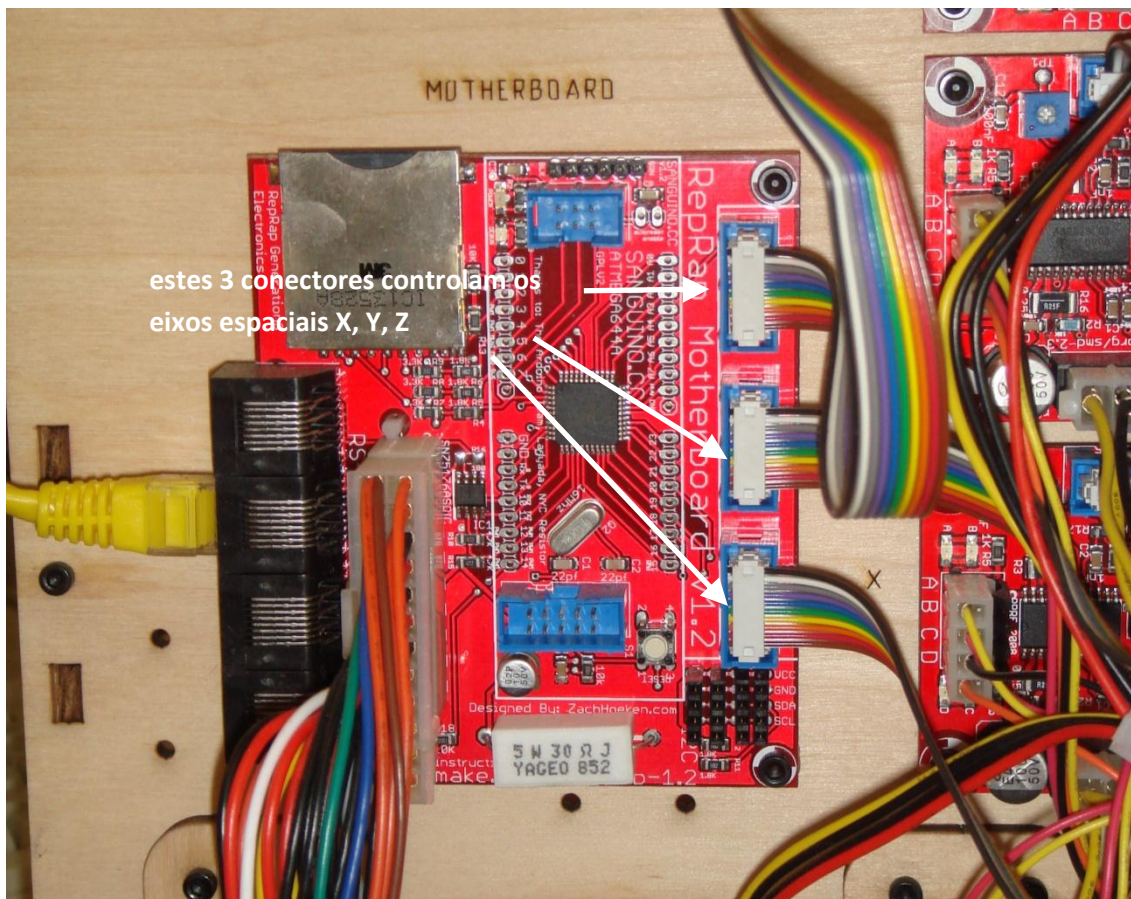


Fig. 164 – Placa que controla o movimento da base

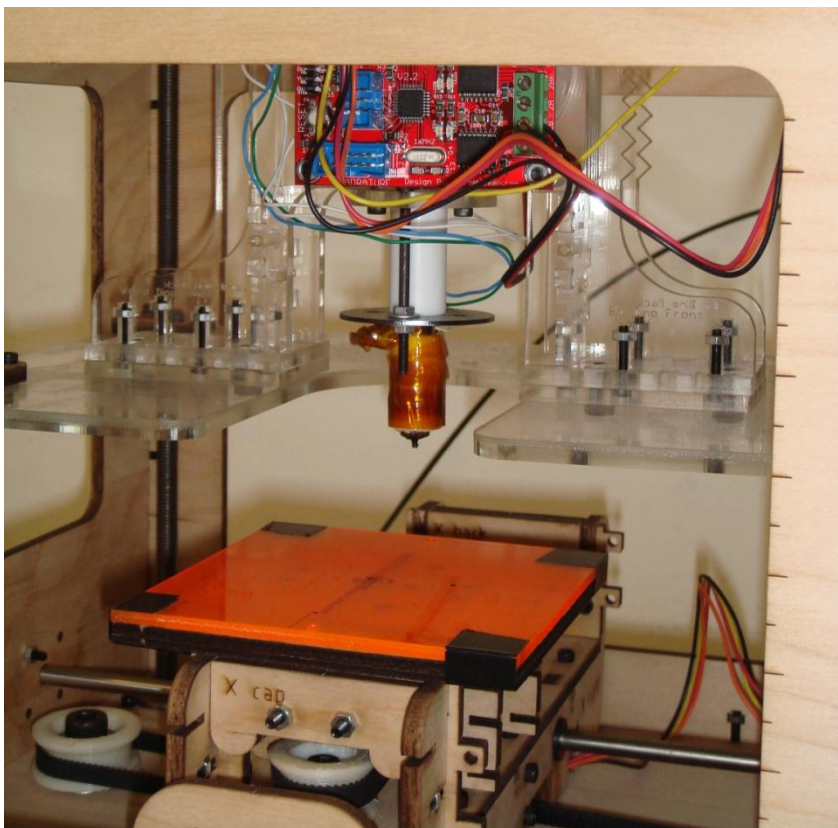


Fig. 165 – O bloco com o bocal está fixo e a base move-se nos 3 eixos espaciais durante a fabricação

8. Conclusões

Varrimento Laser 3D

Neste resumo foram descritos a maioria dos processos para extrair e medir nuvens de pontos em superfícies poligonais, para no fim se poder visualizar o objecto num ambiente tridimensional.

Foi também dado a conhecer um panorama de várias soluções para modelação/visualização, incluindo pacotes baseados em *splines*.

Mesmo que o conceito de algoritmos do software de modelação seja simples, o seu desempenho está directamente relacionado com o hardware. Além disso, todo o software existente para modelação e visualização 3D de objectos, é específico para um dado conjunto de dados.

Os pacotes comerciais de *'engenharia reversa'* (definição do método de varrimento laser 3D) não produzem malhas correctas sem NP densas. Por outro lado, as ferramentas de visualização nada podem fazer para melhorar um objecto mal modelado e o processo de *render* pode apresentar-se ainda pior, se o nível de detalhe (LoD) não estiver bem controlado ou mesmo disponível.

Tecnologia segura – é composta por sistemas laser não nocivos ao operador nem aos objectos que podem ser de extrema fragilidade.

Tecnologia versátil – pode ser usada em diferentes materiais, excepto objectos totalmente transparentes ou reflectivos. Pode ser usada em vários ambientes, incluindo ambientes submersos. Pode ser usada numa gama extensa de tamanhos, desde locais arqueológicos até pequenas e quase invisíveis inscrições em pedras.

Tecnologia de grande precisão – pode atingir a precisão de micrómetros (milésima parte de 1 milímetro), permitindo uma documentação muito detalhada de um objecto antigo.

Inconvenientes – grande conteúdo de dados da informação recolhida, tornando-se num processo moroso e requerendo computadores com grande capacidade de desempenho para as operações de pós-processamento.

Fig. 166



Prototipagem Rápida

Actualmente a Prototipagem Rápida está longe de ser a corrente principal como ferramenta útil ao processo de criação e fabricação de objectos. Contudo, com tempo, tornar-se-á a referência principal para processos de desenvolvimento e fabricação de produtos.

Usando tecnologia aditiva, este processo distingue-se de todos os outros, pois permite fabricar rapidamente partes ou objectos extremamente complexos.

Assim a PR será uma de muitas opções disponíveis para a concretização de projectos, de uma maneira, rápida, precisa e monetariamente eficiente.

“A impressão 3D está a evoluir a passos largos e até já há quem acredite que vão chegar às nossas secretárias dentro de poucos anos.”

«Os protótipos rápidos permitem poupar muito dinheiro e tempo. Por exemplo, é 100 vezes mais caro corrigir o projecto, depois de se produzirem as primeiras unidades funcionais, do que se o fizemos durante o desenho.» John Hirschtick (fundador e antigo director-geral da SolidWorks)

«...nada substitui o acto de podermos tocar no objecto» Matthew Dunbar (responsável máximo da área CAD da New Balance)

in revista “Exame Informática”, n.º 178, Abril 2010, p.p. 89-91



Fig. 167

Apesar de serem ainda duas tecnologias que não estão ao alcance de todos, são sem dúvida ferramentas indispensáveis no tratamento e projecto de arquitectura.

Embora a *'engenharia reversa'* esteja mais direccionada para restituição, reabilitação, documentação e restauro arquitectónicos, não deixa de ser uma mais-valia também no estudo da quarta dimensão da arquitectura: o tempo.

Sendo duas 'tecnologias opostas', ou seja, a primeira extrai o mundo físico para um ambiente tridimensional e a segunda faz precisamente o contrário, podem actuar em conjunto, fazendo parte de um fluxo de trabalhos, procedimentos e conhecimentos. Tudo depende da procura e do que é pretendido.

Com estas duas tecnologias, hoje é possível, por ex., restituir digitalmente um sítio arqueológico arquitectónico, cruzando informação histórica factual, lendária e porque não mística?...

A *'mística'* – Imaginando que a informação de um objecto arquitectónico antigo é escassa, apesar de ser possível recriá-lo digitalmente, pode não se ter a certeza do seu uso. E quando menciono o termo da mística refiro-me às histórias contadas por gerações ao longo do tempo, sobre o uso do objecto, ou que imagens continham o seu interior, religiosas ou de outra natureza? Que tipos de cultos se praticavam ali? Seria um local de culto do Bem ou do Mal? Ainda hoje a ciência não consegue decifrar pormenores construtivos das Pirâmides de Gizé, nem perceber como pedras de grande tonelagem na América Sul foram construídas com um grau de precisão que hoje só os computadores conseguem atingir. Objectos arquitectónicos com 5000 anos no Egipto, e outros com cerca de 500 anos na América do Sul (ex. Machu Picchu, Perú)



Fig. 168 – a mística dos muros de Machu Picchu



Fig. 169 – Imagem de Machu Picchu, Perú

O Varrimento Laser 3D é sem dúvida uma tecnologia que veio para ficar e que o campo da arquitectura arqueológica tão bem soube aproveitar. Mas para apresentar um objecto no seu todo formal e funcional, de como era no seu tempo, depende do campo factual da história de maneira a que a sua representação seja a mais fidedigna possível. Quando os factos são escassos ou não existem, recorre-se a teorias, contos, lendas, segredos ou mitos que perduraram ao longo do tempo.



9. GLOSSÁRIO

3D – algo que possui 3 dimensões; largura, comprimento e profundidade; espaço vectorial ou espaço coordenado com 3 dimensões

Algoritmo – sequência finita de instruções bem definidas e não ambíguas, em que cada uma das quais pode ser executada mecanicamente num período de tempo finito e com uma quantidade de esforço finita.

Antialiasing – o efeito de serrilha, normalmente conhecido por *aliasing*, é o efeito em forma de serra que se cria ao desenhar uma recta na diagonal. Uma vez que a divisão mínima num monitor é em pixels surgem os "dentes" da serra ao longo da recta desenhada; o *antialiasing* é um método para minimizar esse efeito, dando a ilusão que a recta é mais perfeita.

API – *Application Programming Interface* (interface de programação de aplicativos); é composta por uma série de funções acessíveis somente por programação, e que permitem utilizar características do software menos evidentes ao utilizador tradicional.

AVI – *Audio Video Interleave*; formato de áudio e vídeo criado pela Microsoft® cuja extensão oficial é *.avi*; é um dos formatos mais populares no mundo, sendo reconhecido pela maioria das versões do sistema operativos Windows®.

Browser – é o programa utilizado para navegar na internet; ex. Microsoft Internet Explorer, Mozilla Firefox, etc.

CNC – Computer Numeric Control (controlo numérico por computador); permite o controlo simultâneo de vários eixos, através de uma lista de movimentos escrita num código específico; produz peças complexas com grande precisão, quando associado a programas de CAD/CAM.

CPU – Central Processing Unit (unidade central de processamento); também chamado de processador, é o elemento principal e o dispositivo que controla todas as instruções de um programa de computador.

Curva de Bezier – A curva de Bezier é uma curva polinomial expressa como a interpolação linear entre alguns pontos representativos, chamados de pontos de controlo. É uma curva utilizada em diversas aplicações gráficas como o Photoshop e CorelDraw e formatos de imagem vectorial; é também utilizada em modelação tridimensional.

Filtragem Wiener – publicada pelo matemático Norbert Wiener em 1949; propunha reduzir a quantidade de ruído presente num sinal, por comparação com a estima do sinal desejado e sem ruído.

Fotopolímero – é um polímero que atinge a cura ou passa ao estado sólido, quando exposto à luz, normalmente no espectro ultra-violeta.

Fragmentos Coon – são superfícies ajustadas entre quatro curvas arbitrarias que definem uma fronteira.

LIDAR – (Light Detection And Range) detecção e alcance de luz; é uma tecnologia de sensor óptico e remoto que mede propriedades de luz dispersa, de maneira a encontrar o alcance e/ou outra informação de um alvo distante.

Linux – sistema operativo alternativo de código livre.

Meshes – malha poligonal ou grelha não estruturada que é composta por vértices, arestas e faces que definem a forma de um objecto poliédrico num ambiente gráfico 3D.

MIPmapping – na filtragem de texturas de gráficos 3D, os *mipmaps* são conjuntos de imagens pré calculadas e optimizadas que acompanham a textura principal; tem como objectivo aumentar o tempo de rendering e reduzir o aliasing; é usado em jogos 3D, simuladores de voo e outros sistemas de visualização 3D.

M.I.T. – Massachusetts Institute of Technology

MPEG – Moving Picture Experts Group; foi formado pela ISO para definir padrões para a compressão e transmissão de áudio e vídeo.

Normal – é uma recta perpendicular a uma superfície, que parte do ponto de incidência de um raio de luz sobre essa mesma superfície.

Nyquist – linguagem de programação para síntese e análise de som baseada na linguagem *Lisp*.

PCI-Express – também conhecido como PCIe é o padrão actual de slots ou encaixes para placas de expansão utilizadas em PC; criada pela Intel® e introduzido em 2004, o PCI Express foi concebido para substituir os padrões AGP (accelerated graphics port) e PCI (peripheral component interconnect).

Perfil alar – perfil do corte transversal da asa de uma aeronave.

Pixel – em imagem digital, o pixel é um ponto único numa imagem rasterizada; o pixel é o mais pequeno elemento representado num ecrã; é a mais pequena unidade de imagem que pode ser controlada.

Plástico ABS – *Acrylonitrile butadiene styrene (acrilonitrilo butidieno estireno)*; termoplástico comum utilizado em modelos rígidos e leves, tais como tubagens, partes automóveis, brinquedos, peças de Lego, etc.

Plug-in – programa usado para adicionar funções extra a programas principais, fornecendo funcionalidades especiais ou mais específicas.

RAM – Random Access Memory (memória de acesso aleatório); é uma forma de armazenamento de dados em computador; hoje em dia toma a forma de circuitos integrados que permitem armazenar dados para serem acedido de qualquer ordem (daí, aleatório); equipa qualquer tipo de computador ou pequenos dispositivos, como pen-drives, telemóveis, agendas electrónicas, etc.

Raytracing – utilizado pelo algoritmo que se baseia na simulação do trajecto que os raios de luz percorreriam no mundo real, mas, neste caso, de trás para a frente; no mundo real, os raios de luz são emitidos a partir de uma fonte de luz, percorrendo o espaço até encontrar um objecto; após os raios de luz atingirem o objecto, estes são refractados ou reflectidos, de acordo com as características do objecto, nomeadamente, cor, textura e transparência, alterando assim a sua trajectória, e fazendo com que apenas uma infinitésima minoria dos raios que partiram da fonte de luz atinjam, por fim, os olhos do observador.

Render – processo de gerar uma imagem a partir de um modelo 3D, através de um programa de computador; o modelo é descrito como um objecto tridimensional numa dada linguagem ou estrutura de dados; contem informação de geometria, pontos-de-vista, textura, luz e sombra; a imagem gerada pode ser digital ou rasterizada.

RGB – *Red Green and Blue* (Vermelho, Verde e Azul) iniciais das cores aditivas primárias.

Silicon Graphics – actualmente SGI; é uma empresa norte americana de soluções para computação de alto desempenho, incluindo hardware e software.

Simplicial – um complexo simplicial S é uma colecção finita de simplexes, tais que cada face de um simplexo de S é um simplexo de S e a intersecção de dois simplexos de S é vazia ou uma face de ambos; à dimensão máxima dos simplexos de S chama-se a dimensão de S ; ex. de simplexos: 0-simplex → ponto; 1-simplex → segmento de recta; 2-simplex → triângulo; 3-simplex → tetraedro.

Spline – o termo *spline* é normalmente referido como uma segmentação polinomial (paramétrica) de uma curva; as splines são populares neste campo visto serem de simples construção, avaliam-se de uma maneira fácil e precisa e têm a capacidade de aproximar formas complexas através de desenho de curvas interactivas de ajuste fácil.

Superfície fechada – em matemática, uma superfície fechada é constituída por um múltiplo fechado de duas dimensões; a definição poderá necessitar que tenham um único componente relacionado; exemplos: a esfera, o torus e a *Garrafa de Klein*.

Superfícies Paramétricas – são definidas por parâmetros matemáticos necessários para uma completa e relevante especificação e representação de um modelo ou objecto geométrico.

Técnica Ionográfica – técnica utilizada em impressão, em que a imagem é formada a partir do controlo de projecção de iões e da sua carga electrostática.

Tetraedrização de Delaunay – em matemática e geometria computacional, a triangulação de *Delaunay* para um conjunto de pontos P no plano, é uma triangulação $DT(P)$, de tal modo que nenhum ponto P se encontre dentro de um circuncírculo de nenhum triângulo em $DT(P)$; a DT minimiza o mínimo ângulo de todos os triângulos na triangulação; tende a evitar triângulos muito justos; foi inventado por Boris Delaunay em 1934.

The Digital Michelangelo Project – em 1999, dois grupos de investigação da Universidade de Stanford, usaram um sistema de varrimento laser personalizado para digitalizarem a estátua de Miguel Ângelo em Florença.

VRML – (**V**irtual **R**eality **M**odeling **L**anguage – Linguagem para **M**odelação de **R**ealidade **V**irtual) é um padrão de formato de arquivos para realidade virtual, utilizado tanto para a internet como para ambientes desktop. Por meio desta linguagem, escrita em modo de texto, é possível criar objectos (malhas poligonais) tridimensionais podendo definir cor, transparência, brilho, textura (associando-a a um bitmap).

10. GLOSSÁRIO DE FIGURAS

Fig. 1 – Imagem em 3D da Capela de S. Frutuoso de Montélios

Fig. 2 – A “Horadada” antes do colapso

Fig. 3 – A “Horadada” depois do colapso

Fig. 4 – Recuperação de um dos fragmentos

Fig. 5 – Resultado do varrimento laser da ilha em ambiente 3D

Fig. 6 – Modelo prototipado da ilha – os fragmentos foram colocados de maneira a fidelizar ao máximo a sua morfologia original

Fig. 7 – Depois de um novo varrimento laser obteve-se a forma definitiva em 3D, para a operação de reconstrução

Fig. 8 – Esquema da solução de fixação, à base de um arco de betão armado pré-fabricado. Toda a descrição do trabalho sobre a “Isla de La Horadada”

Fig. 9 – 3 Tipos de varrimento – varrimento ponto-a-ponto, em banda e por área

Fig. 10 – Tecnologia de captura da forma humana – *Head Scanner*

Fig. 11 – Tecnologia de captura da forma humana – evolução para *Full Body Scanner*

Fig. 12 – Máquina REPLICA que marcou grandes avanços no varrimento laser em 1994

Fig. 13 – a máquina da *Digibots* fazia um varrimento completo mas tornava-se lenta por utilizar o método de ponto a ponto

Fig. 14 – Em 1996 a *ModelMaker* era o sistema mais completo de varrimento combinando um braço móvel e varrimento em banda

Fig. 15 – *ModelMaker*

Fig. 16 – Fluxo operativo das fases de projecto arquitectónico – o acompanhamento da prototipagem rápida onde a maquete antecede o projecto

Fig. 17 – Máquina de prototipagem rápida

Fig. 18 – Exemplo de uma maquete criada a partir de prototipagem rápida

Fig. 19 – espaço tridimensional definido pelas coordenadas X,Y,Z

Fig. 20 – Da nuvem de pontos ao modelo 3D

Fig. 21 – Esquema do princípio de funcionamento laser – método do ‘tempo-de-voo’

Fig. 22 – O Scanner com sistema LIDAR* é o sistema normalmente utilizado para varrimento de grandes objectos tais como edifícios, formações rochosas, etc. É baseado no tipo de medição por ‘tempo-de-voo’

Fig. 23 – **Optech ILRIS-3D Intelligent Laser Ranging and imaging System** – Exemplo da máquina usada para o varrimento e posterior estudo da *Isla de la Horadada*

Fig. 24 – Resultado do varrimento - “Isla de La Horadada”

Fig. 25 – A vinculação da geometria à sua textura é um processo de tentativa e erro

Fig. 26 – Malha poligonal gerada a partir de nuvem de pontos

Fig. 27 – Exemplo de elementos de curvas paramétricas com os respectivos pontos de controlo

Fig. 28 – Exemplo de varrimento múltiplo de uma cabeça humana, em que os pontos comuns são ajustados de maneira a obter-se coerência da forma final

Fig. 29 – Malha gerada por nuvens de pontos do interior de um edifício

Fig. 30 – A mesma malha depois de tratada e texturada

Fig. 31 – Diagrama de *Voronoi* – cada região é formada por segmentos relativos ao número de pontos, ou nós, na vizinhança do ponto considerado. Assim, um nó com 5 pontos na vizinhança está contido numa região com 5 lados

Fig. 32 – Triangulação *Delaunay* (direita) Conectando os nós das células de Voroni que têm regiões comuns, formam-se os triângulos Delaunay

Fig. 33 – Comparação de um modelo 3D antes e depois de tratamento de suavização

Fig. 34 – Ambiente 3D com tratamento fotorrealista – texturas de alta resolução, efeitos realistas de luz, sombra, reflexo

Fig. 35 – Ambiente 3D com tratamento fotorrealista (exterior)

Fig. 36 – Vista de um modelo 3D do *Buda Bamiyan*, representado em *wireframe*, *flat shaded* e *modo texturado*

Fig. 37 *Microstation* – Resultado de *render* com *ray tracing**

Fig. 38 – Resultado em *3D Studio Max*

Fig. 39 – Malha ondulada, gerada a partir de conjuntos de superfícies irregulares com quatro vértices

Fig. 40 – Exemplo de complexidade num modelo prototipado

Fig. 41 – À esquerda, modelo prototipado. À direita, modelo da peça final

Fig. 42 – Processo esquemático da estereolitografia

Fig. 43 – Esquemas desenhados: vista geral do aparato

Fig. 44 – Esquemas desenhados: os 4 passos para a criação de uma camada do objecto

Fig. 45 – Esquemas desenhados: quando existem partes salientes no objecto, são necessários suportes até que as primeiras camadas da saliência endureçam

Fig. 46 – Peça completa

Fig. 47 – Esquema gráfico da LOM

Fig. 48 – Esquema desenhado da LOM

Fig. 49 – Esquema gráfico – no FDM o bocal que fornece o material, move-se nos 3 eixos espaciais

Fig. 50 – Esquema desenhado – a plataforma está a uma temperatura baixa para endurecer o material termoplástico

Fig. 51 – Esquema gráfico – o pistão à esquerda fornece o pó termoplástico para o reservatório à direita, onde o modelo está a ser fabricado

Fig. 52 – Esquema desenhado do mesmo processo

Fig. 53 – Processo similar à sinterização, só que aqui em vez do laser, existe uma cabeça com jacto-de-tinta. O jacto de tinta move-se em X e Y, e a plataforma move-se em Z, descendo à medida que cada camada é criada

Fig. 54 – O mesmo processo em desenho

Fig. 55 – Aparato em desenho do SGC (Solid Ground Curing)

Fig. 56 – SGC – Superfície plana pulverizada

Fig. 57 – SGC – Foto-máscara

Fig. 58 – SGC – Endurecimento da resina com luz UV

Fig. 59 – SGC – Tubo de vácuo retirando a resina não curada

Fig. 60 – SGC – Aplicação de resina em áreas não curadas

Fig. 61 – SGC – Remoção da cera e detritos, através do tubo de aspiração

Fig. 62 – Esquema desenhado do interface Sanders ModelMaker

Fig. 63 – Multi-Jet modelling – uma boa opção para ter em ambiente de escritório

Figs. 64, 65, 66 – Modelos prototipados, mostrando vários níveis de complexidade

Figs. 67, 68, 69 – maquetas – a prototipagem rápida na arquitectura

Fig. 70 – Modelo 3D da Capela de S. Frutuoso de Montélios

Fig. 71 – Perspectiva isométrica da Capela com corte horizontal e vertical

Fig. 72 – Planta da Capela

Fig. 73 – Igreja de São Frutuoso

74 – Imagem exterior da Capela

75 – Interior da Capela

76 – Reconstrução em 1931

Figs. 77, 78 – Parte fabricada pelo Prof. Dr. Francisco Agostinho

Figs. 79, 80 – Primeiros esboços sobre como operar nas várias fachadas e coberturas

Fig. 81 – Fachada separada em várias malhas

82 – Erros espaciais

83 – Operação de tratamento dos polígonos nas malhas

Fig. 84 – Primeiro esquema pensado para a fabricação do modelo

Fig. 85 – O esquema anterior ocupa uma área muito grande, logo mais caro de fabricar. Assim optou-se pela fabricação dos vários troços de fachada

Fig. 86 – Malha em ‘bruto’, gerada a partir da nuvem de pontos – Capela de S. Frutuoso de Montélios, Braga – *Rhinoceros 4.0*

Fig. 87 – Primeiros esquiços sobre como operar nas várias fachadas

Fig. 88 – Criação de *Layers* para cada fachada de maneira a otimizar o processo de execução das operações 3D – *Rhinoceros 4.0*

Fig. 89 – Modelo em 3D representando as malhas escolhidas nos respectivos layers de cores diferentes – *Rhinoceros 4.0*

Fig. 90 – Modelo em 3D representando as malhas escolhidas para tratamento (aqui com as coberturas) – *Rhinoceros 4.0*

Fig. 91 – Estrutura interna auxiliar

Fig. 92 – Estrutura regular interna auxiliar – *Rhinoceros 4.0*

Figs. 93, 94, 95, 96, 97 – As várias sub-malhas constituintes da malha principal

Fig. 98 – Malhas separadas e desalinhas


Figs. 99, 100 – Utilizando o comando `_DeleteMeshFaces` carregando no respectivo botão , menu *Mesh Tools*, apagam-se os triângulos necessários


Fig. 101 – Carregando no botão *Add mesh face*  → *Mesh Tools Menu*, clica-se em cima dos respectivos vértices para criar um triângulo

Fig. 102 – Linha de comandos – *Rhinoceros 4.0*

Fig. 103 – Quando se clica num dos vértices pode aparecer um sub-menu para escolher entre vértice (*vertex*) ou aresta (*edge*)

Fig. 104 – Depois de se ‘picarem’ os três vértices, o novo triângulo é criado

Fig. 105 – O processo repete-se até que a malha fique refeita e unida

Fig. 106 – Malha unificada

Fig. 107 – Intersecção de polígonos

Fig. 108 – Polígonos incoerentes e desalinhas espacialmente

Fig. 109 – Picos ou ‘*spikes*’

Fig. 110 – Polígonos duplicados ou sobrepostos


Fig. 111 – Utilizando o comando `_3DFace` → *Mesh Menu*, botão  *Single Mesh Face*, e recorrendo à estrutura interna, cria-se a superfície picando sequencialmente em 4 pontos

Fig. 112 – Este comando permite criar uma superfície com 3 pontos ou 4, desde que o 4.º ponto pertença ao mesmo plano

Fig. 113 – Neste exemplo, como a superfície interna é constituída por 5 arestas, devem-se criar duas superfícies iguais com 4 arestas e depois unificá-las

Fig. 114 – Um exemplo de superfície interna com 4 arestas

Figs. 115, 116 – De seguida liga-se a fachada principal à superfície interna. Visto a fachada principal ser irregular e a interna ser regular, os ‘planos de fecho’ são constituídos por triângulos. Durante este processo utilizam-se os

comandos *Single Mesh Face*  e *Add Mesh Face* .

Figs. 117, 118 – Por fim fecha-se o ‘troço de fachada’ em todo o seu contorno

Figs. 119, 120 – O processo repete-se nas restantes malhas

Fig. 121 – Devido à espessura de cada troço de fachada, foi necessário fazer com que os planos onde os troços coincidem, fizessem um ângulo aproximado de 45º

Fig. 122 – Foi necessário também achar uma inclinação nos planos do Frontão, para que estes não intersectem os planos da cobertura

Figs. 123, 124, 125 – As margens de cada fachada devem estar totalmente coincidentes, polígono a polígono

Figs. 126, 127 – As faces contíguas entre cada troço de fachada são iguais, de maneira a facilitar a construção do modelo depois de fabricado

Fig. 128, 129, 130 – A construção das coberturas obedece ao mesmo critério descrito anteriormente, mas aqui em planos diferentes. Como se observa, tira-se partido da estrutura auxiliar para definir os planos que formam o objecto

Fig. 131, 132 – Imagem explodida dos 10 troços criados

Fig. 133 – No fim da construção 3D, cada troço deve ser uma e uma só malha conjunta


Fig. 134 – Usando o botão ‘Join’ , reúnem-se todos os polígonos de cada troço numa malha única

Fig. 135 – Pegando num dos troços como exemplo, procede-se então à exportação para o formato pretendido .STL – *menu File → Export Selected*

Fig. 136 – A linha de comandos indica para se seleccionar o objecto e de seguida pressionar a tecla *Enter*

Figs. 137, 138 – Depois de se carregar em *Enter*, aparece uma caixa onde se vai escolher o tipo de ficheiro .STL – dá-se o nome do ficheiro em cima (neste caso ‘fachada01’) e em baixo escolhe-se o tipo do ficheiro .STL

Fig. 139 – Opções de exportação do ficheiro

Fig. 140 – ficheiro .STL

Fig. 141 – O programa **MiniMagics 2.0** é distribuído gratuitamente pela empresa **Materialise®**

Fig. 142 – Visualização do modelo no *MiniMagics 2.0* – as partes do modelo a vermelho, são erros que têm de ser corrigidos

Fig. 143 – Painel de controlo e opções do *MiniMagics 2.0*

Fig. 144 – *Materialise® STLFix* – ferramenta online para correcção de erros nos modelos

Fig. 145 – Minimizar os erros através do Plug-in *ReduceMesh – Rhinoceros 4.0*

Fig. 146 – Minimizar os erros

- Fig. 147 – Descrição dos erros do modelo no *Minimagics*
- Fig. 148 – Os erros do modelo são apresentados a vermelho
- Fig. 149, 150 – *Materialise® STLFix* – Serviço online de correcção automática dos modelos
- Fig. 151 – Escolha do ficheiro e carregamento no site
- Fig. 152 – Os projectos carregados ficam arquivados e em espera até serem corrigidos
- Fig. 153, 154 – parte corrigida pelo *STLFix*
- Fig. 155, 156, 157 – cortes nos 3 eixos espaciais da parte corrigida
- Fig. 158 – Interface gráfico do programa *Skeinforge*, onde entre muitas opções, se vai escolher o tipo de perfil da fabricação e o tipo de material
- Fig. 159, 160 – imagens da máquina de fabricação *Makerbot*
- Fig. 161 – Imagem do *Makerbot* da Faculdade de Arquitectura da U.T.L.
- Fig. 162 – Faixas de polímero para a fabricação
- Fig. 163 – A câmara de fabricação
- Fig. 164 – Placa de circuitos integrados, que controla o movimento da base
- Fig. 165 – O bloco com o bocal está fixo e a base move-se nos 3 eixos espaciais durante a fabricação
- Fig. 166 – Varrimento Laser 3D – conclusão
- Fig. 167 – Prototipagem Rápida – conclusão
- Fig. 168 – A mística dos muros de *Machu Picchu*
- Fig. 169 – Imagem de Machu Picchu, Perú

11. Bibliografia

- 3D Systems Corporation, 333 Three D Systems Circle
Rock Hill, SC 29730, South Carolina, USA – 26-04-10
<http://www.3dsystems.com/appsolutions/casestudies/pdf/Fonco_3DM_CaseStudy.pdf>
- Alves, Fernando Jorge Lina, et al. – “*PROTOTIPAGEM RÁPIDA*”, *PROTOclick!*, Porto, 2001
<<http://www.protoclick.com/>> - 02-02-11
- Cultural Heritage Imaging: Web Resources* – Cultural Heritage Imaging 2325, 3rd Street, Suite #323, San Francisco, CA 94107, USA – 20-04-10
<http://www.c-h-i.org/technology/3d/3d_real_world.html>
- D’Apuzzo, Nicola, et al., ETH – Swiss Federal Institute of Technology Zurich – *Chair of Photogrammetry and Remote Sensing – Research, Publications*, 14/12/09 <<http://www.photogrammetry.ethz.ch/research/publications.html>>
- eFunda – *The Ultimate Online Reference for Engineers* – eFunda, Inc., P.O. Box 64400, Sunnyvale, CA 94088, USA – 24-04-10 <http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/intro.cfm>
- José Martínéz, Juan – *II Seminário Internacional – Conservação, Restauo e Reabilitação; Metodologias de Levantamento; Contributo para o projecto de conservação de metodologias documentais baseadas na fotogrametria digital e na digitalização laser 3d terrestres* – ‘Cubo’, Faculdade de Arquitectura da U.T.L., 29-05-09
- Magno, Sérgio, “*Impressoras que Fabricam*”, Exame Informática, Editora Imprensa, n.º 178, Abril 2010, p.p. 89-91
- MATEUS Luís, FONTES Luís, AGUIAR José, CATALÃO Sofia, BOTICA Natália, AGOSTINHO Francisco; “*A report on multiple approaches to the S. Frutuoso of Montélios Chapel survey*”, *proceedings of the 9th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage* – VAST 2008, p.51-55, Departamento de Informática da Universidade do Minho, Braga, 2008, ISBN 978-972-99166-7-0
- Optech Inc. – *ILRIS-3D Intelligent Laser Ranging and Imaging System* - **Optech Incorporated**, 300 Interchange Way, Vaughan, Ontario, Canada – 24-04-10 <<http://www.optech.ca/i3dprodline-ilris3d.htm>>
- Point Clouds*, 14-04-10 <<http://www.stanford.edu/~ctj/pc.html>>
- Rapid Prototyping and Solid Freeform Fabrication – The Worldwide Guide* – CASTLE ISLAND CO., 119 WEBSTER STREET, ARLINGTON, MA 02474, U.S.A – 14-04-10 <http://www.additive3d.com/sb_k.htm>
- Remondino, F., et al. Portal of Architectural Image-Based-Modeling – *The “3D-ARCH” Project – 3D virtual reconstruction and visualization of complex architectures*, June 2009
<http://www.map.archi.fr/aibm/Portal_of_Architectural_Image-Based-Modeling/Article-Remondino.html>
- Stereolithography.com – Knowledgebase Home* – 20-05-10 <<http://knowledge.stereolithography.com/activekb/>>
- Villegas, L., et al. – *Estudios sobre la viabilidad técnica de la reconstrucción de la Isla Horadada en la bahía de Santander* – Proyecto de investigación realizado a petición del Excmo. Ayuntamiento de Santander. Universidad de Cantabria, 2008 – 25-04-10 <http://grupos.unican.es/gted/archivos/otros/ponencias/rehabend08_horadada.pdf>
- Vosselman, G., Sithole, G., 2004: “*Recognizing structure in laser scanner point clouds*”. NATSCAN International conference: “Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment - Instruments, Processing Methods and Applications”, 3 - 6 October 2004, Freiburg, Germany
<<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.118.6228&rep=rep1&type=pdf>>
- Wikipedia, The Free Encyclopedia* – Wikimedia Foundation Inc. – 27-04-10 <<http://www.wikipedia.org/>>
- WordPress Weblog – *Applications 3D* – 28-05-10 <<http://www.applications3d.com/Blog/>>
- Z Corporation, 32 Second Avenue, Burlington, Massashusts, 01803 USA < <http://www.zcorp.com/en/home.aspx>>

12. Links úteis:

Software de 'engenharia reversa' e CAD, para operações de modelação

3D Reshaper <<http://www.3dreshaper.com/>>
AutoCAD <<http://www.autodesk.pt/adsk/servlet/pc/index?siteID=459664&id=14600964>>
Cyclone <http://hds.leica-geosystems.com/en/Leica-Cyclone_6515.htm>
Farfield <<http://www.farfieldtechnology.com/>>
Geomagic <<http://www.geomagic.com/en/products/studio/>>
Imageware Surfacer <<http://www.metrologyworld.com/product.mvc/Imageware-Surfacer-0001>>
Microstation <<http://www.bentley.com/en-US/Products/microstation+product+line/>>
Paraform <http://www.inhousesolutions.com/pdf/addons/Paraform_3.0.pdf>
Polyworks <<http://www.innovmetric.com/polyworks/3D-scanners/home.aspx?lang=en>>
Rapidform <<http://www.rapidform.com/>>
Solidworks <<http://www.solidworks.com/sw/products/mechanical-engineering-cad-software.htm>>
Spatial Analyzer <<http://www.kinematics.com/products/spatialanalyzer/overview.html>>

Pacotes de animação por computador

3D Shockwave <<http://www.net-powerinc.com/3dmodels.html>>
3D Studio Max <<http://www.autodesk.pt/adsk/servlet/pc/index?siteID=459664&id=14609318>>
AC3D <<http://www.invis.com/>>
Amira <<http://www.amira.com/>>
Animation Master <http://www.hash.com/store/index.php?main_page=product_info&cPath=5&products_id=22>
Bryce <http://www.daz3d.com/i/software/bryce?_m=d>
Cinema 4D <<http://www.maxon.net/products/cinema-4d.html>>
Corel Dream 3D <<http://www.corel.com/servlet/Satellite/eu/en/Product/1191272117978#tabview=tab0>>
Easymodel <http://www.ciao.co.uk/Autodesk_Easymodel_2_3_Review_5008579>
Extreme 3D <<http://www.quickerwit.com/product.cfm?p1=953&p2=1&p3=2>>
I-Sculpt n/a
Lightwave <<http://www.newtek.com/lightwave/#>>
Maya <<http://www.autodesk.pt/adsk/servlet/pc/index?siteID=459664&id=14627200>>
Model Magic 3D <<http://www.imagewaredev.com/>>
Poser <<http://poser.smithmicro.com/poser.html>>
RenderMan <<https://renderman.pixar.com/products/tools/rms.html>>
Rhinoceros <<http://www.rhino3d.com/>>
Softimage 3D <<http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/pc/index?siteID=123112&id=13571168>>
Vue <http://www.e-onsoftware.com/products/vue/vue_8.5_xstream/>
World Builder <<http://www.digi-element.com/wb/index.htm>>

Pacotes de visualização

Arcinfo <<http://itc.virginia.edu/research/esri/arcinfo83.html>>
ArcView <<http://www.esri.com/software/arcgis/arcview/index.html>>
Cosmo Player <<http://www.karmanaut.com/cosmo/player/>>
GeomView <<http://www.geomview.org/>>
Idrisi <<http://www.clarklabs.org/products/index.cfm>>
Inventor <<http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/pc/index?siteID=123112&id=13717655>>
Macromedia Editor <<http://www.adobe.com/products/dreamweaver/>>
VirtualGIS <<http://gi.leica-geosystems.com/documents/pdf/IMAGINEVirtualGISProductDEscription.pdf>>
Skyline <<http://www.skylinesoft.com/SkylineGlobe/Corporate/Products/SkylineGlobeWebPackage.aspx?>>
Scene Viewer <<http://www.marinilli.com/projects/java3d/java3d.html>>
TerrainView <<http://www.viewtec.net/index.php?page=terrainview>>
TerraVista <<http://software.ione.ch/terravista/news.html>>
VirtuoZo <<http://www.supresoft.com/products/virtuozovirtuozosm.htm>>
Vis5D+ <<http://vis5d.sourceforge.net/>>
VMware <<http://www.vmware.com/>>

ANEXOS

Tecnologia	Stereolithography	Jetted Photopolymer	Selective Laser Sintering	Single Jet Inkjet	Laminated Object Manufacturing	Fused Deposition Modeling	Three Dimensional Printing
Acrónimo	SLA	J-P	SLS	MM	LOM	FDM	3DP
Representante Comercial	3D Systems™		EOS GmbH™	Solidscap™	Solido Ltd.™	Stratasys™	Z Corp.™
Características qualitativas gerais							
Espaço máximo para fabrico aprox. (mm)	505 x 505 x 610	300 x 185 x 200	700 x 380 x 585	305 x 150 x 230	160 x 210 x 135	610 x 505 x 610	505 x 610 x 405
Velocidade	Média	Rápida	Média a rápida	Baixa	Rápida	Baixa	Excelente
Precisão	Muito boa	Boa a Muito boa	Boa	Excelente	Razoável	Razoável	Razoável
Acabamento	Muito bom	Bom a Muito bom	Bom a Muito bom	Excelente	Razoável	Razoável	Razoável
Vantagens	Tamanhos grandes, Precisão	Precisão e acabamentos, 'Office-friendly'	Precisão, Materiais	Precisão, Acabamento, 'Office-friendly'	'Office-friendly', Tamanho, Preço	'Office-friendly', Preço, Materiais	Velocidade, 'Office-friendly', Preço, Cores
Desvantagens	Pós-processamento, Sujidade do líquido	Tamanho e peso, Pós-processamento	Tamanho e peso, Preço, Acabamento	Velocidade, Materiais limitados, Tamanho das partes	Materiais limitados, Acabamento e precisão	Velocidade	Materiais limitados, Partes frágeis, Acabamento
Aplicações típicas	.Modelos e partes muito detalhados para testes de dimensionamento e forma .Partes e modelos para marketing e apresentações	.Modelos e partes muito detalhados para testes de dimensionamento e forma .Partes e modelos para marketing e apresentações .Padrões para moldes de investimento .Padrões para uretano e moldagem RTV*	.Ligeiramente menos detalhe de modelos, partes e formas de teste comparado com métodos baseados em fotopolímeros .Fabrico rápido incluindo partes grandes como por ex. condutas de ar .Partes com encaixes e dobradiças .Padrões para moldagem	.Maioria de partes detalhadas disponível usando tecnologia aditiva para testes de dimensionamento e forma .Padrões para moldagem, especialmente para joalharia e dispositivos médicos .Padrões para uretano e modelagem RTV*	.Partes e modelos menos detalhados para testes de dimensionamento e forma .Padrões para uretano e moldagem RTV* .Grandes padrões para moldes de areia	.Maioria de partes detalhadas disponível usando tecnologia aditiva para testes de dimensionamento e forma .Partes de plástico para aplicações a alta temperatura .Partes e modelos para marketing e apresentações .Fabricação rápida de pequenas partes detalhadas .Fabricação de ferramentas especializadas Padrões para uretano e modelagem RTV*	.Modelos conceptuais .Partes para testes funcionais limitados .Modelos com aplicação de cor FEA* .Modelos para arquitectura e terreno .Modelos coloridos para design industrial Moldes
Gama de preços (euros – valores aproximados) €	60K – 650K	32.5K – 70K	163K – 810K	57K – 65K	8K – 195K	12K – 245K	16K – 57K
Materiais							
Propriedades e características	Acrílicos Materiais transparentes e rígidos Mat. do tipo ABS* Mat. do tipo polipropileno* Flexíveis ou elastoméricos Resistentes à água	Acrílicos Elastómeros	Nylon, vidro, alumínio, carbono e outros mat. com forte resistência; Polistirenos (PP); Elastómeros; Aço e ligas de aço inoxidável; ligas de bronze; titânio	Plásticos poliéster Moldes de cera	Faixas unidas de PVC-plástico Papel reforçado por união	ABS Policarbonato (PC) Elastómeros	Compostos e ligas de gesso Elastómeros Moldes directos

Tecnologias consideradas como impressoras 3D de baixo custo, são apresentadas com esta cor de fundo