

CONCRETO DE ULTRA ALTA PERFORMANCE PARA ESTRUTURAS DE MÁQUINAS FERRAMENTAS

Arthur Poliselli Farsky 1

Raphael Galdino dos Santos 1

Inspere – Instituto de Ensino e Pesquisa, Rua Quata 300 - São Paulo - SP

arthurpf1@al.insper.edu.br

raphaelgs@insper.edu.br

Roberto Christ 2

Unisinos – Universidade do Vale do Rio Sinos, Av. Unisinos 950 - São Leopoldo - RS

rchrist@unisinos.br

Resumo: Concreto convencional não é uma opção tradicional para estrutura de máquina ferramenta devido suas propriedades mecânicas insuficientes. No entanto, com o avanço de tecnologias em formulações de concreto, foi criado o concreto de ultra alto desempenho (ultra high performance concret - UHPC). O UHPC apresenta propriedades superiores ao concreto convencional, as quais favorecem o seu emprego para estruturas mecânicas de máquinas ferramentas. A estrutura da máquina ferramenta é responsável por manter a configuração geométrica e resistir a diversos esforços mecânicos. Dentre as propriedades desejadas para estrutura, o UHPC se destaca no amortecimento, baixa densidade e custo inferior que permitem a realização de estruturas com seções transversais maiores. A menor rigidez é o ponto desfavorável frente aos materiais mais comumente utilizados, a qual pode ser compensada pela maior seção transversal. No sentido de aprofundar o entendimento do UHPC em máquinas ferramentas, esse trabalho teve como objetivo comparar diferentes ligas de ferro fundido com concreto UHPC para a aplicação em questão. Foi realizado uma revisão do estado da arte, levantamento de propriedades relevantes a aplicação e simulações computacionais de forma a averiguar a performance do novo material em estrutura de máquinas-ferramenta. Foi encontrado nas simulações computacionais que é possível fazer um retrofit de uma máquina ferramenta com sua estrutura em ferro fundido melhorando sua rigidez em média de 14%, tendo um perfil semelhante de frequências naturais e aumentando seu amortecimento em mais de 5 vezes. Além de melhoras em performance foi encontrado que com a substituição de materiais, o custo em matéria prima da estrutura foi reduzido de R\$51.082 para R\$ 6.188.

Palavras-chave: Concreto; UHPC; Máquinas-ferramenta.

1. INTRODUÇÃO

A estrutura de uma máquina-ferramenta é um componente funcional essencial dentro do sistema de usinagem. As principais tarefas da estrutura da máquina são a garantia da configuração geométrica dos elementos sob cargas estáticas, dinâmicas e térmicas, bem como a absorção e orientação de forças e torques.

O comportamento mecânico e térmico de uma estrutura de máquina depende das propriedades elementares do material empregado, entre as quais incluem o módulo de Young, módulo de cisalhamento, resistência à flexão e tração, amortecimento do material, densidade, condutividade, capacidade de calor, coeficiente de expansão térmica, as dimensões e seções transversais da estrutura, suas junções e integração no fluxo de força do sistema de usinagem (Möhrling, H.-C., 2015 “a”).

A estrutura da máquina-ferramenta tem grande efeito na performance da capacidade produtiva. Desta forma, existem várias estratégias de estruturas com materiais diferentes, que atingem resultados finais variados. Um dos materiais empregados é o concreto de ultra alto desempenho (ultra high performance concret – UHPC) (Möhrling, H.-C., 2015 “a”).

O UHPC possui potencial de ser substituto das tecnologias mais utilizadas na indústria de máquina-ferramenta. Apesar de ser um material mais frágil e com resistência à tração inferior a de metais, o UHPC possui custo muito inferior e menor densidade, sendo possível a realização de seções transversais maiores com custos inferiores. Ademais, o amortecimento superior e módulo de young na mesma ordem de grandeza, aumenta o potencial do UHPC de produzir peças com rigidez e amortecimento superiores a sua contrapartida em metal.

Nesse trabalho foi feita uma análise de substituição da estrutura de máquinas-ferramenta feitas com ferros fundidos pelo UHPC. Serão analisados o custo, densidade, resistência mecânica, módulo de young e amortecimento. Foi analisado também particularidades do processo de manufatura de uma peça em concreto. Esses dados foram posteriormente comparados com sua contrapartida em metal.

2. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

2.1. Características físicas para a produção de estrutura de uma máquina ferramenta.

Vibrações indesejáveis podem estar presentes em quase todas as operações de corte, devido ao mecanismo de geração do cavaco. Esse fenômeno é um dos principais obstáculos para alcançar a produtividade esperada. A vibração regenerativa é a mais prejudicial para qualquer processo, pois cria excesso de movimento relativo entre a ferramenta e a peça de trabalho, resultando em um acabamento superficial ruim, ruído agudo, desgaste acelerado da ferramenta e, ainda, reduz a vida útil da máquina-ferramenta, que por sua vez impacta na confiabilidade e segurança de operações de usinagem (Siddhpura, M., & Paurobally, R. 2012).

Por sua vez, as propriedades mecânicas que fazem com que uma máquina-ferramenta reduza os níveis de vibração em um determinado processo são a sua rigidez e o amortecimento (Tobias SA, Fishwick W, 1958). Quanto maior a rigidez do sistema e maior o amortecimento, melhor será o comportamento da máquina.

2.2. Concreto cimentício para produção de estrutura de uma máquina ferramenta.

A ideia de aplicação de concreto cimentício não é nova. Em 1986 foi construído um barramento de um torno em uma mistura de concreto com malhas metálicas de reforço. Tais características foram comparadas a um barramento já existente de ferro fundido. A análise da performance do novo barramento mostrou que a nova peça contém propriedades de amortecimento consideravelmente superiores à do ferro fundido, e que valores de rigidez foram semelhantes. Desta forma, neste trabalho já foi evidenciado que componentes em materiais cimentícios poderiam trazer vantagens frente aos metálicos (Rahman, M *et al*, 1987).

Em 1993 foi realizada outra sequência de testes, sendo que desta vez foram montados dois tornos completos com barramentos análogos ao do estudo mencionado acima. Neste, foi observado que para o torno cimentício foi possível atingir uma profundidade de corte 39% maior antes de iniciar vibrações regenerativas, as quais foram detectadas por marcas na peça. Fazendo a mesma análise, aplicando métodos sonoros para identificação de vibrações, foi atingido uma profundidade 53% maior (Rahman, M., Mansur, M. A., & Chua, K. H., 1993).

Em 2001 foi novamente realizado outra sequência de testes com os mesmos tornos. Desta vez foi observado o tempo de vida de uma ferramenta de corte. Novamente, o torno cimentício apresentou vantagem sobre o metálico. A vida da ferramenta foi superior, fenômeno atribuído ao maior amortecimento do torno cimentício (Rahman, M., Mansur, M. A., & Lau, S. H, 2001).

2.3. UHPC (Ultra High Performance Concrete)

De uma forma resumida, o concreto convencional é uma mistura de pasta e agregados. A pasta, composta de cimento e água, reveste a superfície dos agregados. Por meio de uma reação química chamada hidratação, a pasta endurece e ganha força para formar a massa rochosa, conhecida como concreto. Dentro deste processo está a chave para uma característica notável do concreto: é plástico e maleável quando recém misturado, forte e durável quando endurecido (Cement.Org, 2020).

O UHPC é uma nova classe de concreto desenvolvida na França na década de 1990, com características superiores a concretos convencionais, incluindo alta trabalhabilidade e resistência à compressão, maior ductilidade e alta resistência a ataques ambientais (Akhnoukh, A. K., & Buckhalter, C, 2021).

O concreto UHPC, utiliza matérias primas semelhantes ao concreto convencional, mas se diferencia na utilização de alta quantidade de aditivos plastificantes e na análise granulométrica dos seus constituintes. A utilização destes aditivos possibilita a utilização de menos água mantendo sua trabalhabilidade, consequentemente melhorando sua performance. Quanto a análise granulométrica, ela permite realizar um arranjo na matriz do concreto que contém menos vazios microscópicos, assim, constitui menos concentradores de tensão, que definem a resistência do concreto.

Para a formulação de um traço de UHPC, é necessário prestar atenção em algumas propriedades, como o: 1) empacotamento granular, 2) relação água/cimento, 3) teor de aglomerante e 4) dosagem de fibras, como descrevemos a seguir.

A inexistência de porosidades no interior de uma mistura de UHPC é, sem dúvida, um dos principais parâmetros almejados em sua dosagem. Para tanto, desenvolver uma mistura com uma proporção adequada de cada tamanho de partícula, em cada faixa granulométrica, é o princípio do processo (Richard *et al*, 1995).

A determinação das proporções de cada material em uma mistura acaba sendo o grande obstáculo a ser vencido. Os materiais empregados no UHPC são materiais de pequeno diâmetro, porém estes possuem uma faixa de granulometria ampla, o que ocasiona, muitas vezes, a sobreposição de diâmetros iguais em distintos materiais. (Guises, Romain *et al*, 2009).

A redução de água a ser incorporada na mistura não apenas melhora a resistência mecânica do material, mas também impacta negativamente na trabalhabilidade da mistura, propriedade compensada com a utilização de aditivo superplastificantes. A redução da adição de água nas misturas só é possível devido ao avanço dos aditivos; sem estes, o

desenvolvimento dos concretos UHPC não seria possível. A redução da água foi gradual, sendo possível desenvolver novos tipos de concreto, com propriedades mecânicas e reológicas distintas. (Eugen Bruhwiler, Emmanuel Denairé, 2008)

O aglomerante é a parte proporciona a aglutinação dos demais componentes do concreto. Sendo assim, a escolha do aglomerante tem grande relevância no processo de elaboração de um UHPC.

O principal aglomerante atualmente utilizado é o cimento Portland, mas o mesmo pode ser associado a outros aglomerantes como o a cinza volante e sílica ativa. A proporção desses aglomerantes dentro da matriz de concreto tem grande influência na performance final do concreto.

A fibra presente nos UHPC tem a finalidade de adicionar ductibilidade ao concreto. São fibras aleatoriamente dispersas na mistura de concreto. Diferente da ductibilidade conhecida na engenharia mecânica, a ductibilidade em questão se refere ao comportamento posterior a quebra da matriz de concreto, onde a o esforço mecânico é transferido para as fibras.

No doutorado de Roberto Christ, foi elaborado uma forma de se desenvolver um traço de UHPC utilizando materiais locais. Tal método consiste em 4 etapas principais, a primeira, consiste na escolha de materiais para matéria prima e o levantamento da curva granulométrica dos mesmos. A segunda etapa consiste no levantamento da melhor proporção de cada material de forma a obter o melhor empacotamento possível. A terceira fase é a determinação de teor máximo de fibras no traço de concreto mantendo as condições reológicas no estado fresco do concreto. Na última etapa, é levantado o diagrama de desempenho do traço de concreto. (Christ, R, 2019)

2.4 UHPC em máquinas ferramentas

Com esses novos avanços nas tecnologias do concreto UHCP, a ideia de produzir máquinas-ferramentas com esse material parece ainda ser mais atrativa.

Já existem empresas que utilizam dessa tecnologia para construção de máquinas ferramentas, sendo que uma dessas é a DURACRETE que atingiu um material com propriedades de 80 GPa de modulo de elasticidade, 20 Mpa de resistência a flexão e amortecimento muito superior a materiais metálicos (Duracrete, 2022).

Já foram realizados estudos relativos à ancoragem de materiais metálicos na matriz de concreto, visando a indústria de máquinas ferramentas. O mesmo indica que as resistências apresentadas são mais que suficientes para a aplicação (Kalthoff, M., & Raupach, M, 2021). No entanto, algumas análises devem ser realizadas após a ancoragem dos materiais metálicos, como:

1. Comportamento térmico combinado do UHPC e de materiais ferrosos. Ambos têm expansão térmica semelhantes; assim materiais metálicos embutidos no material cimentício não geraria tensão interna devido a expansão térmica;
2. A capacidade calorífica, uma vez que esta é maior no concreto, ou seja, é necessária mais energia para fazer com que o material mude de temperatura. (Möhring, H.-C *et al* 2015 “b”) Consequentemente suas dimensões.
3. Retração do concreto, pois durante a cura do concreto, o mesmo tem a tendência de diminuir suas dimensões. Isso se torna um problema quando outros materiais são introduzidos à peça, pois o concreto terá sua retração restrita, o que poderá levar a tensões internas. Na aplicação de máquinas ferramentas, essa condição pode estar presente quando são embutidas chapas metálicas para instalação de componentes de precisão. Essa questão, apesar de ser uma dificuldade, já apresenta soluções na indústria de indústria civil. Um dos métodos mais utilizados é um processo de cura controlado e a utilização de aditivos especializados na redução da retração do concreto. No concreto UHPC foi atingido uma redução de 63% na retração com a utilização de 2% de aditivo. (Androuët, C., & Charron, J.-P., 2021).
4. Fadiga em UHPC é um fator relevante. Foi encontrado que componentes que resistiram 10^6 ciclos podem ser considerados com vida infinita. No entanto, esse dado não é consistente em todas as pesquisas disponíveis. (Abbas, S., Nehdi, M. L., & Saleem, M. A., 2016). Vale ressaltar que a maior parte das tensões é conferida pelo peso de componentes, portanto em condição estática. As tensões dinâmicas são dadas pela movimentação de componentes na máquina e por vibrações durante o corte. Foi indicado que devido às tensões apresentadas na estrutura de uma máquina serem muito inferiores que o limite de escoamento do concreto, a fadiga deste material pode ser desconsiderada.

Outro fator que vem se tornado cada vez mais relevante é o impacto no ecossistema. Apesar da produção do cimento ser um processo que libera quantidades consideráveis de CO_2 no ambiente, o ciclo de vida de uma peça de UHPC é mais sustentável que uma peça em ferro fundido. Ainda, isso é dado pelo processo de fundição que apresenta grande impacto ao ambiente. Pesquisas indicam que a peça em UHPC libera em torno de 30% menos CO_2 no ambiente em comparação com uma peça em ferro fundido cinzento. (Sudholt-Wasemann, 2022)

3. Objetivo

Do exposto acima, pode-se concluir que apesar do emprego de concreto cimentício para produção de estrutura de uma máquina ferramenta ainda apresenta pontos a serem considerados, porém os resultados que estão sendo obtidos nas

tentativas experimentais e industriais, sugerem benefícios do emprego destas tecnologias em relação às metálicas. Devido a este material se apresentar potencial como substituto, esse trabalho teve por objetivo analisar o estado da arte de manufatura de bases de máquinas-ferramenta em UHPC, levantar valores de propriedades relevantes para confecção de estruturas de máquinas-ferramenta e realização de uma simulação computacional de uma máquina-ferramenta para análise de variáveis relevantes ao processo de usinagem.

4. Metodologia

A metodologia será dividida em subseções de para melhor entendimento de cada análise feita. Inicialmente foi feito uma análise pelo método de elementos finitos de forma a avaliar as tensões presentes na estrutura e a rigidez resultante. Posteriormente será introduzido os ensaios realizados ao UHPC de forma a levantar propriedades do material e por último será levantado os custos.

4.1 Análise de Métodos de Elementos Finitos

A análise computacional tem como objetivo prever as características da máquina-ferramenta, antes mesmo da construção de um protótipo físico. Será analisado a rigidez da máquina, incluindo componentes além da estrutura, modos de vibração e o volume de sua estrutura.

Foi inicialmente utilizado um modelo virtual (CAD) de uma máquina ferramenta para a análise da substituição da estrutura por UHPC. Conexões entre componentes como fuso de esfera, rolamentos e guias lineares foram substituídos por conexões do tipo mola e conexões rígidas. Os valores de rigidez de cada componente seguem as especificações dos catálogos de seus respectivos fabricantes. Fixações por parafusos foram consideradas com rigidez infinita.

Para a máquina em ferro fundido, assumiu-se o GG-25. Para máquina em UHPC foi utilizado valores normalmente encontrados na indústria civil para esse tipo de concreto. As características dos materiais estão apresentadas na tab. 1 a seguir:

Propriedade	UHPC	GG-25	Grandeza
Modulo de elasticidade	40	110	GPa
Resistência a compressão	140	950	MPa
Resistência a tração	20	250	MPa
Densidade	2500	7200	kg/m ³

Tabela 1. Propriedades materiais das máquinas.

A máquina em esta apresentada nas Fig. 1 e Fig. 2 a seguir:

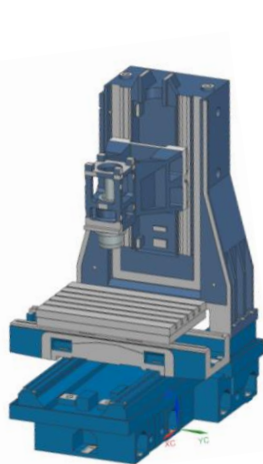


Figura 1. Máquina original

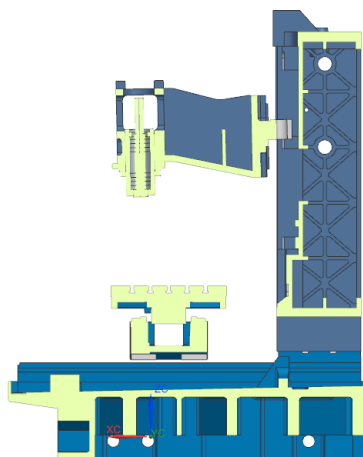


Figura 2. Máquina em Corte

Para a máquina em Concreto, modificações extras foram realizadas. Dado que as características do concreto são de menor resistência e menor densidade, é necessário fazer com que a máquina tenha menos alívio de massa. Os componentes que melhor se adaptam a essas mudanças são a base a coluna, assim a análise de mudança de material será feita somente nesses componentes. Foi retirada os alívios de massa nos componentes assim como o aumentado a espessura da conexão

entre a coluna e a base. A última mudança foi que componentes muito delgados foram feitos mais espessos, uma vez que o concreto é um material frágil e impactos poderiam causar rupturas.

Para análise de vibrações, tensões e rigidez, os pés da máquina foram considerados engastados, uma vez que esse componente é parafusado no em uma fundação reforçada.

4.2 Confeção de corpos de prova de UHPC

Para confecção dos corpos de prova de UHPC foi utilizado a metodologia de Roberto Christ (Christ, R, 2019). Inicialmente foram coletadas amostras de matérias primas para confecção do concreto, sendo elas a sílica ativa, cinza volante, cimento branco e areia fina da região. Após a determinação da distribuição granulométrica de cada componente, foi levantado um traço ideal visando o índice de compactação.

Com as proporções dos sólidos definida, foram criados 3 traços de concreto distintos, variando apenas a proporção de fibra e água. As proporções de cada material em cada traço estão descritos na Tab. 2.

Material	kg/m3 para confecção do traço 1	kg/m3 para confecção do traço 2	kg/m3 para confecção do traço 3
Cimento branco	654	654	654
Sílica ativa	251,25	251,25	251,25
Cinza volante	248,75	248,75	248,75
Areia	1067,25	1067,25	1067,25
Água	255	208,6364	255
Fibra Metálica	0	59.75	0
Super plastificante	23	23	23

Tabela 2. Diferença de composição entre os traços de UHPC

Após a confecção dos corpos de prova, a cura do concreto foi realizada em um ambiente com umidade relativa de 100%, e temperatura controlada em 23 graus Celsius.

Após 28 dias de cura dos corpos de provas, foram realizados testes para se determinar a resistência à compressão, resistência à tração por flexão e módulo de elasticidade. Todos os testes são padronizados pelas normas ABNT.

Para o ensaio de compressão foi utilizado a ABNT NBR 5739; para o teste de tração por flexão, foi empregada a, ABNT NBR 12142; e para o módulo de elasticidade, a ABNT NBR 8522.

4.3 Teste de amortecimento

Para a análise do amortecimento dos corpos de prova de concreto bem como a de materiais metálicos, foi feita uma análise comparativa entre eles. Utilizou-se um corpo de prova de dimensões fixas, mudando somente o material. Foi posicionado um acelerômetro em uma das bases do corpo, e no outro foi impactado com um martelo instrumentado. A impactação foi feita de forma que os corpos de prova estivessem livres para vibrar em todos os graus de liberdade. Foram capturadas as respostas e amortecimento de cada corpo.

4.4 Análise de custo

Para a análise de custo, foi levantado o preço da matéria prima dos componentes de concreto, sendo esse o custo mais relevante do processo produtivo. É necessário ressaltar que existe o custo de molde, custo de hora máquina e processo de cura, mas esses custos não serão analisados nesse estudo. Para o preço do ferro fundido será analisado o custo da matéria prima; mas vale ressaltar que existem outros componentes relevantes para a análise, como a energia necessária para fundir a peça e confeccionar a peça, custo da hora máquina e custo da confecção de moldes.

5. Resultados

5.1 Análise de Métodos de Elementos Finitos

Primeiramente ao analisara as tensões na estrutura, foi escolhido a situação mais crítica. Essa se encontra muito a abaixo de tensões de admissíveis, tanto para o concreto como para demais estruturas metálicas. Os maiores valores de tensões se encontram nas conexões entre componentes, tendo como pico 5Mpa.

Para a rigidez, todos os resultados apresentaram melhora na máquina em concreto. O ponto medido foi na face do eixo arvore para todas as situações. A rigidez é apresentada na Tab. 3:

Rigidez	Ferro Fundido – GG25	UHPC
X	23.8 $\mu\text{m/kN}$	17.6 $\mu\text{m/kN}$
Y	11.4 $\mu\text{m/kN}$	11.1 $\mu\text{m/kN}$
Z	18.1 $\mu\text{m/kN}$	17.8 $\mu\text{m/kN}$

Tabela 3. Comparação de rigidez das máquinas

O peso apresentou um aumento considerável como apresentado na Tab 4. a seguir:

Peso	Ferro Fundido – GG25	UHPC
Base	1762 kg	2530 kg
Coluna	1306 kg	1859 kg
Coluna + base	3068 kg	4389 kg

Tabela 4. Comparação de peso de máquinas

Por último, as frequências naturais e os modos de vibrar se mantiveram semelhantes entre as máquinas representadas na Tab 5.

Modos	Ferro fundido GG-25	UHPC
1°	42 Hz	43 Hz
2°	58 Hz	57 Hz
3°	84 Hz	103 Hz
4°	104 Hz	124 Hz
5°	128 Hz	126 Hz
6°	136 Hz	134 Hz
7°	144 Hz	143 Hz
8°	188 Hz	178 Hz
9°	193 Hz	242 Hz
10°	230 Hz	257 Hz

Tabela 5. Comparação de frequências naturais de máquinas

Nesta análise faz-se ressalvas, pois o modelo é uma aproximação da realidade. Temos por exemplo que os incertos de metais utilizados para montagem de superfícies de precisão foram ignorados, não foram utilizadas ferramenta no cone do eixo arvore e fixações de peças, assim ignorado as deformações destes componentes, os pés da máquina foram considerados engastados e por último não foi considerado pesos como motores e trocador de ferramenta, o que pode influenciar nos modos de vibrar.

Apesar das ressalvas acima mencionadas, perceber que o concreto atinge as necessidades de rigidez e de tensões admissíveis. Vale ressaltar que as tensões nos materiais foram somente retiradas em esforços de usinagem, transporte pode apresentar outras solicitações mecânicas não analisada.

Essa análise foi realizada com base em uma máquina existente, assim se aproximando a um retrofit. Uma nova máquina com estrutura desenhada levando em consideração o material UHPC pode ser desenvolvida de forma a atingir outros resultados.

5.2 Teste de compressão

O resultado dos testes de compressão este exibido na Tab. 6:

Coluna 1	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Grandeza
Ensaio 1	137,2014	127,9264	97,2048	Mpa
Ensaio 2	130,1342	141,9418	83,7144	Mpa
Media	133,6678	134,9341	90,4596	Mpa

Tabela 6. Resultado ensaio de compressão

Pode ser verificar que o traço 1 teve resultado mais consistente, com menor variabilidade entre os dois ensaios, enquanto os traços 2 e 3 tiveram maior variação em suas amostras

5.3 Teste de Flexão

O resultado dos testes de tração por flexão está exibido na Tab. 7:

Coluna 1	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Grandeza
Ensaio 1	7,492	9,978	6,263	MPa
Ensaio 2	6,229	7,757	9,266	MPa
Ensaio 3	6,923	9,266	7,852	MPa
Media	6,881333	8,8675	7,7645	MPa

Tabela 7. Resultado ensaio de flexão

Da mesma forma que o observado para os testes de compressão, os resultados de teste de tração foram mais homogêneos no traço 1.

Abaixo estão exibidas as Fig. 3, Fig. 4 e Fig. 5 dos corpos de prova rompidos no ensaio de tração por flexão:

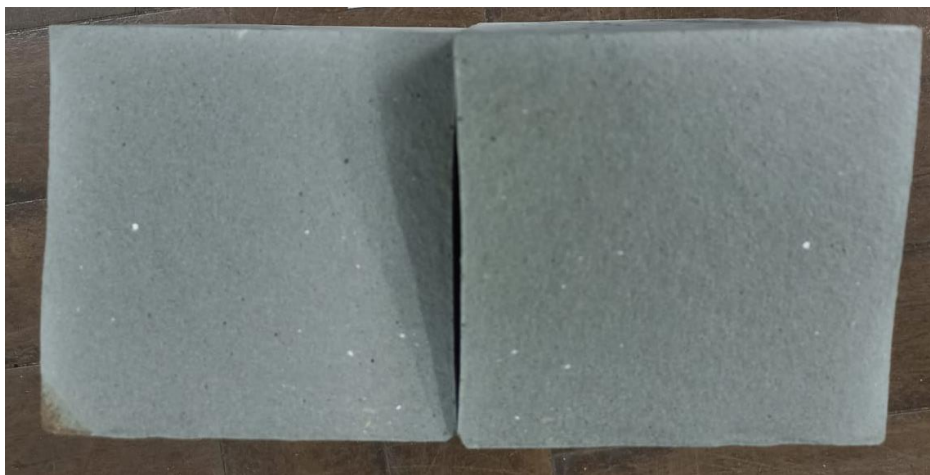


Figura 3. Face rompida do traço 1 de UHPC



Figura 4. Face rompida do traço 2 de UHPC



Figura 5. Face rompida do traço 3 de UHPC

É possível observar que no traço 2 e no traço 3 foram encontrados porosidade maiores. Pode se atribuir à maior variabilidade nos ensaios de compressão e tração a disposição das porosidades. Quando o cimento em seu estado fresco é despejado na forma, bolhas de ar podem ser incorporadas. Caso essas bolhas não sejam retiradas, tanto meios ativos, com vibração, ou pela própria reologia do concreto, essas bolhas ficam incorporadas na matriz. Essas bolhas são considerados defeitos no concreto, uma vez que sua presença funciona como um concentrador de tensão. Dado a aleatoriedade do padrão das bolhas no concreto, é introduzido uma maior incerteza nas propriedades mecânicas da peça.

Em todos os traços de concreto estão presentes aglomerados de cimento branco, visíveis por pontos esbranquiçados na matriz de concreto. Sua dimensão é inferior à das bolhas de ar, portanto sua influência nas propriedades físicas são menos relevantes.

Esses defeitos na produção do concreto afeta diversas propriedades. Apesar de ser mais fácil de evidenciar esses defeitos no teste de flexão, seus efeitos estão presentes em todos os testes.

5.4 Módulo de elasticidade

Os resultados dos testes de módulo de elasticidade estão evidenciados na Tab. 8.

Propriedade	Traço 1	Traço 2	Traço 3	GG-25	GGG-40	Grandeza
Módulo de elasticidade	34,88	38,4	39	110	169	GPa

Tabela 8. Módulo de elasticidade dos traços uhpc e ferros fundido

Pode se evidenciar que o módulo de elasticidade do concreto é inferior ao de suas contrapartidas metálicas, porém ele está dentro da mesma ordem de magnitude.

5.5 Ensaio de amortecimento

Os resultados dos ensaios de amortecimento estão evidenciados na Tab. 9.

Propriedade	Traço 1	Traço 2	Traço 3	GG-25	GGG-40	Grandeza
Amortecimento	0,476	0,553	0,643	0,085	0,150	%

Tabela 9. Amortecimento dos traços uhpc e ferros fundido

Os resultados são somente comparativos, porém se evidencia que o concreto apresenta um amortecimento superior aos ferros fundidos.

5.6 Análise de custo

Para análise do custo da matéria-prima, foi levantado o custo de cada insumo do traço de concreto. Foi desconsiderado o custo da água, portanto a diferença de custo entre o traço 1 e 3 é inexistente, uma vez que a única mudança é a quantidade de água.

Uma tabela referente ao custo do concreto é exibida a seguir na Tab. 10:

Material	Preço por kg (reais)	Material utilizado para confecção de 1 m3 do traço 1 (kg)	Material utilizado para confecção de 1 m3 do traço 2 (kg)	Material utilizado para confecção de 1 m3 do traço 3 (kg)
Cimento branco	3,4	654	654	654
Sílica ativa	1,5	251,25	251,25	251,25
Cinza volante	0,15	248,75	248,75	248,75
Areia	0,08	1067,25	1067,25	1067,25
Água	-	-	-	-
Fibra Metálica	22	-	59,75	-
Super Plastificante	35	23	23	23
Preço (reais)	-	1,411267	1,937067	1,411267

Tabela 10. Preço por kg de UHPC

Sabendo o peso de cada estrutura e sabendo o custo por quilograma, podemos levantar uma estimativa do custo final de cada peça. A Tab. 11 apresenta tal estimativa.

	Coluna + Base GG-25	Coluna + Base UHPC
Peso	3068kg	4389kg
Preço/kg	R\$16,65	R\$1,41
Preço total	R\$51.082	R\$6.188

Tabela 11. Análise de preço do estrutura da máquina-ferramenta

O resumo dos resultados das propriedades está exibido na Tab. 12.

Propriedade	Traço 1	Traço 2	Traço 3	GG-25	GGG-40	Grandeza
Módulo de elasticidade	35	38	39	110	169	GPa
Resistência a compressão	133,7	134,9	90,4	950	800	MPa
Resistência a tração	6,8	9,0	7,3	250	400	MPa
Amortecimento	0,476	0,553	0,643	0,0850	0,150	%
Custo	1,41	1,94	1,41	16.6	19.8	Reais/kg

Tabela 12. Propriedades dos traços uhpc e ferro fundido

Vale resaltar que o preço dos materiais foi cotado em uma região e um período de tempo específico, os valores estão sujeitos a variações.

6. Conclusões

O UHPC em máquinas ferramentas é um material promissor. É um material muito mais barato que suas contrapartidas metálicas, com isso é possível fazer máquina com seções transversais muito maiores. Para uma peça em concreto que apresentar rigidez semelhante a uma metálica, o seu amortecimento será muito superior, resultando em menor desgaste de componentes, maior vida de ferramenta e possibilidade de maior produtividade.

O traço 2 do concreto UHPC em questão apresentou 9 MPa de resistência a tração, o suficiente para construir uma base de máquina, uma vez que elas são dimensionadas de forma a atingir rigidez altas, consequentemente tensões baixas. Apesar disso, é necessário a aplicação de fatores de segurança o que diminui a tensão admissível. O método de Roberto Christ pode ser utilizado com diferentes materiais de forma a atingir resistências mecânicas maiores. É possível também fazer procedimentos para melhorar as propriedades do material, como a vibração do concreto em seu estado fresco para retirar bolhas de ar e utilização de processos de cura especial. Desta forma, os resultados atingidos nesse estudo devem ser utilizados somente como uma demonstração do material. UHPC com resistência a flexão de 20 MPa não são destoantes da norma e podem ser fabricados da mesma forma que demonstrado nesse estudo.

A amortecimento muito superior do UHPC em contrapartida com o ferro fundido vem com muitas vantagens. O traço 3 obteve um amortecimento 7 vezes superior ao ferro fundido GG-25, o que possibilita realizar cortes mais agressivos sem a presença de vibração, possível se obter acabamentos superficiais superiores reduzindo possíveis pós-processamentos e devido à menor vibração é esperado um desgaste de ferramentas.

Simulações computacionais indicam a viabilidade de um retro-fit a máquinas mantendo a rigidez e não alterando as frequências naturais e reduzindo o custo de R\$51.082 para R\$6.188.

Existem várias questões a serem levantadas para a produção de uma base de máquina em UHPC, como fadiga, cura do concreto, retração do concreto, comportamento térmico e ancoragem de peças. Apesar desses pontos, a indústria de pré-moldados de componentes em concreto já tem conhecimento a respeito, sendo apenas necessário uma transferência de conhecimento entre indústria civil e mecânica.

As pesquisas indicam que UHPC é um material com potencial, uma vez que apresenta melhora de performance, melhora de custo e menor impacto ambiental. A existência de máquinas ferramentas funcionais confeccionadas nesse material e empresas que projetam produtos semelhantes é um indicativo da viabilidade desse projeto.

Para o material se tornar ainda mais promissor, é de grande interesse o aumento do módulo de elasticidade e/ou a diminuição do peso específico. Desta forma é possível fazer com que as máquinas utilizando tal material apresente maior rigidez e/ou menor peso.

7. Agradecimento

Agradeço a indústria Romi S.A. por compartilhar a arquivos e conhecimento de forma a enriquecer estudo realizado

8. Referencias

- Möhring, H.-C., Brecher, C., Abele, E., Fleischer, J., & Bleicher, F. (2015, June 22). Materials in machine tool structures. *CIRP Annals*. Retrieved September 8, 2022, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850615001444?casa_token=fryuYv6IjwIAAAAAA%3AqwcPDoz5DJNT5DtVkytP7A3JQweps8QxmTUhzUBUyvvzimgdJpKCUFM_6WTVTLb2fnQ8utszsOU “a”
- Siddhpura, M., & Paurobally, R. (2012). A review of Chatter Vibration Research in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 61, 27–47. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.05.007>
- Tobias SA, Fishwick W (1958) A theory of regenerative chatter. Engineer, London
- Rahman, M., Mansur, M. A., Ambrose, W. D., & Chua, K. H. (1987). Design, fabrication and performance of a ferrocement machine tool bed. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 27(4), 431–442. [https://doi.org/10.1016/s0890-6955\(87\)80016-0](https://doi.org/10.1016/s0890-6955(87)80016-0)
- Rahman, M., Mansur, M. A., & Chua, K. H. (1993). Evaluation of a lathe with ferrocement bed. *CIRP Annals*, 42(1), 437–440. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)62480-9](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)62480-9)
- Rahman, M., Mansur, M. A., & Lau, S. H. (2001). Tool wear study in a lathe made of cementitious material. *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1-3), 317–321. [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(01\)00612-4](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(01)00612-4)
- Akhnoukh, A. K., & Buckhalter, C. (2021). Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges. *Case Studies in Construction Materials*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00559>
- Cement.org. How concrete is made. Disponível em: <https://www.cement.org/cement-concrete/how-concrete-is-made>. Acesso em: 9 nov. 2020.
- Richard, Pierre; Cheyrezy, Marcel. Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, [s. l.], v. 25, n. 7, p. 1501–1511, 1995.
- Guises, Romain et al. Granular packing: Numerical simulation and the characterisation of the effect of particle shape. *Granular Matter*, [s. l.], v. 11, n. 5, p. 281–292, 2009.
- Eugen Brühwiler; Emmanuel DENARIÉ. Rehabilitation of concrete structures using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete. In: 2º International Symposium on Ultra High Performance Concrete,, 2008.
- Christ, R. (2019, October 20). Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra alto desempenho (UHPC). RDBU. Retrieved September 8, 2022, from <http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/9052>
- Duracrete. Solid machine beds made from Nanodur -concrete - durcrete. Disponível em: https://durcrete.de/wp-content/uploads/2019/12/Nanodur_Maschine_E_12_19.pdf. Acesso em: 9 set. 2022
- Kalthoff, M., & Raupach, M. (2021). Pull-out behaviour of threaded anchors in fibre reinforced ordinary concrete and UHPC for machine tool constructions. *Journal of Building Engineering*, 33, 101842. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101842>
- Möhring, H.-C., Brecher, C., Abele, E., Fleischer, J., & Bleicher, F. (2015). Materials in machine tool structures. *CIRP Annals*, 64(2), 725–748. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.005> “b”

Androuët, C., & Charron, J.-P. (2021). Shrinkage mitigation of an ultra-high performance concrete submitted to various mixing and curing conditions. *Materials*, 14(14), 3982. <https://doi.org/10.3390/ma14143982>

Abbas, S., Nehdi, M. L., & Saleem, M. A. (2016). Ultra-high performance concrete: Mechanical performance, durability, sustainability and implementation challenges. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(3), 271–295. <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0157-4>

Sudholt-Wasemann. Improve sustainability. Disponível em: <https://www.sudholt-wasemann.de/en/industries#machine>. Acesso em: 9 jul. 2022.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O(s) autor(es) é (são) o(s) único(s) responsável(is) pelas informações incluídas neste trabalho.